

LUIZ ALBERTO KOEHLER

**CONTROLE INTEGRADO DE PRIORIDADE E
RETENÇÃO PARA OPERAÇÃO DE SISTEMAS
DE TRANSPORTE PÚBLICO**

FLORIANÓPOLIS

2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CONTROLE INTEGRADO DE PRIORIDADE E
RETENÇÃO PARA OPERAÇÃO DE SISTEMAS
DE TRANSPORTE PÚBLICO**

Tese submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

LUIZ ALBERTO KOEHLER

Florianópolis, maio de 2009.

CONTROLE INTEGRADO DE PRIORIDADE E RETENÇÃO PARA OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE PÚBLICO

Luiz Alberto Koehler

‘Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Automação e Sistemas, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’

Werner Kraus Jr., Ph.D.

Orientador

Kátia Campos de Almeida, Ph.D.

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Werner Kraus Jr., Ph.D.

Presidente

Eduardo Camponogara, Ph.D.

Co-Orientador

Juan Carlos Muñoz, Ph.D.

Luis Antonio Lindau, Ph.D.

José Eduardo Ribeiro Cury, Dr. d’Etat

AGRADECIMENTOS

à Universidade Regional de Blumenau;

ao contribuinte brasileiro;

ao orientador Prof. Werner Kraus Jr.;

ao co-orientador Prof. Eduardo Camponogara;

aos demais professores, Wilson, Marcelo e colegas da PGEEL.

às minhas paixões
Michelle, Heloísa e Sofia

Resumo da Tese apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários
para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

CONTROLE INTEGRADO DE PRIORIDADE E RETENÇÃO PARA OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE PÚBLICO

Luiz Alberto Koehler

Maio/2009

Orientador: Werner Kraus Jr., Ph.D.

Área de Concentração: Automação e Sistemas.

Palavras-chave: prioridade para ônibus, controle de retenção, transporte público, temporização semafórica.

Número de Páginas: 155.

RESUMO: Neste trabalho são apresentadas três estratégias de controle tempo real para sistemas de transporte público por ônibus. O CISPOP (Controle Integrado da Semaforização e Partida do Ônibus do Ponto) é um sistema integrado de controle adaptativo da sinalização de uma interseção isolada e da partida do ônibus do ponto próximo a montante desta interseção. Além do controle da sinalização, função da demanda ou fluxo de veículos na interseção, o modelo utilizado permite a implantação, via controle da sinalização, da prioridade para os ônibus. A contribuição do CISPOP está relacionada com o gerenciamento da partida do ônibus do ponto baseado em dois modos de operação: partida imediata (PI) e partida controlada (PC). Na operação PI, o ônibus parte imediatamente após encerrado o processo de embarque e desembarque. Na operação PC, o ônibus fica retido no ponto para que sua trajetória até a interseção evite uma parada devido à fila de veículos. A escolha entre a operação PI ou PC é baseada no menor custo de operação do sistema de tráfego na interseção.

Buscando tratar o problema de um sistema de transporte público em rede viária, apresenta-se o Método de Solução por Aproximação de Modelo (MSAM), que é um

sistema de controle de retenção para sistemas BRT (do inglês *bus rapid transit*). Partindo de um modelo não linear de sistema BRT com uma função de desempenho não convexa, o MSAM apresenta simplificações usando um procedimento de estimativas iniciais para as variáveis do sistema. O modelo resultante, com função custo convexa e restrições lineares, é facilmente resolvido em tempo real. Os desvios resultantes da simplificação do modelo sobre a variável de controle são tratados através de um processo iterativo de novas estimativas e otimização, até a convergência da variável de controle dentro de uma margem pré-estabelecida.

Por fim, define-se o Controle Integrado de Prioridade e Retenção (CIPER) para tratar o problema do controle do fluxo de veículos nas interseções entre as vias ou corredores exclusivos de sistemas BRT com vias de tráfego convencional. Este problema é resolvido através da integração de dois níveis de operação: um nível local, referente à temporização semafórica das fases BRT nas interseções, com possibilidade de prioridade para os ônibus, e um nível global, que controla o espaçamento temporal ou *headway* entre os diversos ônibus via retenção nos pontos. A estratégia de controle de retenção é baseada no MSAM, com a integração feita através da incorporação de restrições adicionais relativas às fases BRT, dadas pelos planos semafóricos das interseções (nível local), no cálculo dos instantes ótimos de partida dos ônibus dos pontos (nível global). O método resultante desta integração permite uma solução eficiente em tempo real para o problema de controle integrado de prioridade e retenção de sistemas BRT.

Abstract of Thesis presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor in Electrical Engineering.

PRIORITY AND HOLDING INTEGRATED CONTROL FOR THE OPERATION OF PUBLIC TRANSPORT SYSTEMS

Luiz Alberto Koehler

May/2009

Advisor: Werner Kraus Jr., Ph.D.

Area of Concentration: Automation and Systems

Keywords: bus priority, holding control, public transport, intersection control.

Number of Pages: 155.

ABSTRACT: This work presents three methods for real time control of public transport systems. The ICSBDS (Integrated Control of Signal and Bus Departure from Stop) is an integrated system of adaptive signal control for isolated intersections and bus departure control of the stop upstream from the intersection. Beside the signal control, which is a function of the vehicle flow in the intersection, the model allows priority for buses. The main contribution of ICSBDS is related to the management of the bus departure of the stop based on two modes of operation: immediate departure ID and controlled departure CD. In the ID operation the bus departs from the stop immediately after the process of passengers boarding and alighting. In the CD operation, the bus is held up at the stop until the trajectory to the intersection is such that a second stop due the queue of vehicles is avoided. The choice between the ID or CD operation is based on the minimum cost of operation of the traffic in the intersection.

In order to tackle the problem of public transport in road networks, the Solution Method by Model Approximation (SMMA) is introduced, which is a holding control strategy for BRT (bus rapid transit). Starting from a nonlinear model of the BRT system with an associated non-convex performance index, SMMA brings simplifications based on

initial estimates of certain system variables. The resulting model, with a convex performance function and linear constraints, is readily solved in real time. Deviations resulting from the simplifications are treated via an iterative procedure comprising updates of estimates and optimization until the convergence to an accepted margin.

Then, the Priority and Holding Integrated Control (PHIC) is used in the problem of controlling the flow of vehicles on intersections between BRT exclusive lanes and conventional vehicles lanes. This problem is solved by integrating two levels of operation: a local level relative to the intersection signals of the BRT phases with possibility of priority for buses, and a global level which controls the bus holding at stops. The holding control strategy is based on SMMA with the integration done by incorporation of additional restrictions, given by the intersections signal plans (local level), in calculating the optimal bus departure time from stops (global level). The method resulting from this integration allows an efficient solution in real time to the problem of integrated control of priority and retention for BRT systems.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Planejamento e Operação do Sistema de Transporte Público	2
1.2 Sistema de Transporte Urbano tipo BRT	5
1.3 Objetivos	6
1.4 Estrutura do Trabalho de Tese	7
2. OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE PÚBLICO	8
2.1 Introdução	8
2.2 Características da Operação Tempo Real de Sistemas de Transporte Público	8
2.2.1 Estratégias de Controle Tempo Real	9
2.2.2 Características das Estratégias de Controle Tempo Real	10
2.3 Estratégia de Controle Tipo Retenção	12
2.3.1 Tipos de Estratégias de Retenção	13
2.3.2 Estratégia de Controle de Retenção baseada no Espaçamento	15
2.4 Estratégias de Controle Semafórico com Prioridade para Ônibus	17
2.4.1 Características das Estratégias de Prioridade para Ônibus	17
2.4.2 Estrutura de um Sistema de Prioridade para Ônibus	22
2.5 Estrutura Física para o Controle de Retenção e Prioridade	23
2.5.1 Sistemas de Transporte Inteligentes (STI)	23
2.5.2 Arquitetura Típica de um Sistema de Controle de Prioridade	25
2.5.3 Arquitetura Típica de um Sistema de Controle de Retenção	27
3. CONTROLE INTEGRADO DA SEMAFORIZAÇÃO E DA PARTIDA DO ÔNIBUS DO PONTO EM INTERSEÇÃO ISOLADA	29
3.1 Introdução.....	29
3.2 Modelo da Interseção Isolada	31
3.3 Modelo Matemático do Sistema de Tráfego da Interseção Isolada	34
3.4 Gerenciamento da Partida do Ônibus do Ponto	37
3.4.1 Caso para $t_{p_nom} \leq t_r \leq t_{p_max}$ (modo II)	39
3.4.2 Caso para $t_{p_max} < t_r \leq t_{p_ext}$ (modo III)	39
3.4.3 Caso para $0 < t_r < t_{p_nom}$ ou $t_{p_ext} < t_r \leq C$ (modo I)	41
3.5 Modo I: Operação Partida Imediada PI e Partida Controlada PC	41

3.5.1 Operação Partida Imediata PI (modo I _a)	42
3.5.2 Operação Partida Controlada PC (modo I _a)	44
3.5.3 Escolha da Operação: PI ou PC (modo I _a)	47
3.5.4 Restrições para a Temporização Semafórica (modo I _a)	49
3.5.5 Caso para $r_{lnom} \leq t_r < t_{p_nom}$ (modo I _b)	51
3.6 Comentários sobre o CISPOP	52
4. ESTRATÉGIA DE CONTROLE DE RETENÇÃO PARA SISTEMAS BRT	53
4.1 Introdução	53
4.2 Modelo do Sistema BRT	53
4.3 Modelo Ampliado para o Sistema BRT	59
4.4 Método de Solução por Aproximação de Modelo – MSAM	63
4.5 Validação do MSAM	67
4.6 Influência dos Parâmetros $h_{máx}$ e n_N	70
4.7 Estudo de Caso: Aplicação do MSAM	71
4.8 Comentários sobre o MSAM	74
5. CONTROLE INTEGRADO DE PRIORIDADE E RETENÇÃO PARA SISTEMAS BRT	75
5.1 Introdução	75
5.2 Controle Integrado de Prioridade e Retenção – CIPER	76
5.2.1 Prioridade Incondicional no CIPER	78
5.2.2 Prioridade Condicional no CIPER	79
5.3 Estudo de Caso: Aplicação do CIPER	86
5.4 Comentários sobre o CIPER	91
6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	92
APÊNDICE 1	97
APÊNDICE 2	104
APÊNDICE 3	108
APÊNDICE 4	124
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	148

LISTA DE FIGURAS

Figura nº	Título	página
Capítulo 1		
1.1	Classificação do processo de planejamento e operação do sistema de transporte público	3
Capítulo 2		
2.1	Classificação das principais estratégias de controle tempo real para sistemas de transporte público	11
2.2	Classificação das estratégias de prioridade para ônibus	18
2.3	Eventos e intervalos típicos de uma estratégia de prioridade para ônibus	22
2.4	Representação simplificada da arquitetura física e dos fluxos de informação típicos de um sistema de controle de prioridade e retenção	26
Capítulo 3		
3.1	Representação da interseção isolada com duas vias de mão única e o ponto de ônibus	32
3.2	Sistema de gerenciamento da partida do ônibus do ponto próximo à interseção	33
3.3	Perfil típico do fluxo de veículos medido (passado e presente) e estimado (futuro)	33
3.4	Modelo de formação e dissipação da fila de veículos numa via sinalizada	34
3.5	Modos de gerenciamento I, II e III da partida do ônibus do ponto	38
3.6	Trajetória típica do ônibus nas operações PI e PC	41
3.7	Trajetória do ônibus e fila de veículos nas vias 1 e 2 para operação PI	43
3.8	Trajetória do ônibus e fila de veículos nas vias 1 e 2 para operação PC	45
3.9	Comparativo da trajetória do ônibus e da fila de veículos na via 1 para as operações PI e PC	49

Capítulo 4

4.1	Esquema do sistema BRT	54
4.2	Representação do processo de chegada e embarque de passageiros e partida do ônibus do ponto	59
4.3	Representação do espaçamento ou <i>headway</i> entre os ônibus 2, 3 e 4 para o cenário BRT utilizado	68
4.4	Trajetória dos ônibus do sistema BRT sem controle de retenção	72
4.5	Trajetória dos ônibus do sistema BRT com controle de retenção (MSAM)	72

Capítulo 5

5.1	Esquema do sistema BRT com interseções semaforizadas	77
5.2	Esquema do modelo utilizado para o cálculo das fases BRT no caso prioridade incondicional	78
5.3	Esquema do modelo utilizado no cálculo das restrições adicionais para os $d_{i,\omega}$ no caso prioridade condicional	80
5.4	Esquema do modelo utilizado para escolha das restrições adicionais $\delta_{n,kmin}$ e $\delta_{n,kmax}$ relativas às fases BRT no caso prioridade condicional	82
5.5	Trajetória dos ônibus do sistema BRT com controle integrado de prioridade e retenção para um percurso de 10 pontos (prioridade incondicional - CIPER)	88
5.6	Trajetória dos ônibus do sistema BRT com controle integrado de prioridade e retenção para um percurso de 10 pontos (prioridade condicional - CIPER)	88

LISTA DE TABELAS

Tabela nº	Título	Página
Capítulo 3		
3.1	Comparativo do custo total da Interseção nas operações PI e PC para um custo de parada do ônibus $c_{bs}=0$ e $c_{bs}=20$	48
3.2	Valores da temporização nominal r_{1nom} e vermelho mínimo r_{1min} para o primeiro ciclo, para vários valores de fluxo de veículos	50
Capítulo 4		
4.1	Valores calculados via MSAM para $h_{i,\omega}$ considerando várias iterações ($n_N=10$)	69
4.2	Atraso total do sistema BRT (para $n_N=10$)	70
4.3	Influencia dos parâmetros $h_{máx}$ e n_N sobre a ação de controle $h_{i,\omega}$ e o atraso total do sistema BRT (para $n_N=10$)	71
4.4	Comparativo do custo ou atraso total do sistema BRT sem e com controle de retenção (MSAM) para uma volta completa no circuito	74
Capítulo 5		
5.1	Valores das variáveis de controle $h_{i,\omega}$, instante de partida $d_{i,\omega}$ e início da fase BRT $f_{i,\omega}^1$ para prioridade condicional e incondicional (via CIPER)	89

SIMBOLOGIA

Símbolo	Significado	Unidade
Capítulo 3		
D	atraso total de veículos na via por ciclo	s
r	tempo de vermelho na via	s
q	taxa constante do fluxo de veículos na via	veículos/s
s	fluxo de saturação da via	veículos/s
CTI	custo total da interseção por ciclo	\$
D_{car1}	atraso total de veículos na via 1 por ciclo	s
D_{car2}	atraso total de veículos na via 2 por ciclo	s
D_{bus}	atraso do ônibus por ciclo	s
l_{car}	número de passageiros por veículo	
c_d	custo do atraso do passageiro de veículo por segundo	\$/s
l_{bus}	número de passageiros embarcados no ônibus	
c_{bd}	custo do atraso do passageiro embarcado no ônibus por segundo	\$/s
c_{bs}	custo da parada do ônibus devido à fila de veículos na interseção	\$
g	fator de ganho do ônibus associado à política de prioridade adotada	
G	nível de prioridade do ônibus	\$/s
r_{1nom}	tempo de vermelho ou vermelho nominal da via 1 (sem ônibus) para um CTI mínimo [s];	s
C	tempo de ciclo	s
q_1	taxa constante do fluxo de veículos na via 1	veículos/s
q_2	taxa constante do fluxo de veículos na via 2	veículos/s
r_{2nom}	tempo de vermelho ou vermelho nominal da via 2 (sem ônibus) para um CTI mínimo	s
t_{p_nom}	valor mínimo do tempo de partida do ônibus do ponto para que este não fique retido na fila de veículos em sua trajetória até a interseção	s
t_{p_max}	valor máximo do tempo de partida para o ônibus vencer a interseção no ciclo corrente	s

t_{p_ext}	valor máximo do tempo de partida para o ônibus vencer a interseção considerando a extensão máxima do tempo de verde	s
l_v	comprimento médio dos veículos	m
v	velocidade média dos veículos na via	m/s
v_1	velocidade de dissipação da fila de veículos na interseção ($v_1 = sl_v$)	m/s
d_{ponto}	distância do ponto de ônibus até a interseção	m
t_r	instante de requisição de partida do ônibus do ponto (em relação ao início do ciclo)	s
t_{p_II}	instante de partida do ônibus do ponto para o modo II	s
$r_{1_II}^{1ciclo}$	tempo de vermelho da via 1 para o primeiro ciclo no modo II	s
$r_{1_II}^{2ciclo}$	tempo de vermelho da via 1 para o segundo ciclo no modo II	s
t_{p_III}	instante de partida do ônibus do ponto para o modo III	s
$r_{1_III}^{1ciclo}$	tempo de vermelho da via 1 para o primeiro ciclo no modo III	s
$g_{1ext_III}^{1ciclo}$	tempo de verde estendido da via 1 para o primeiro ciclo no modo III	s
$r_{1_III}^{2ciclo}$	tempo de vermelho da via 1 para o segundo ciclo no modo III	s
t_{p_PI}	instante de partida do ônibus do ponto na operação PI	s
t_m	Instante em que o ônibus em sua trajetória até a interseção encontra o final da fila de veículos	s
l_1	comprimento da fila de veículos na via 1	m
r_{1_PI}	tempo de vermelho da via 1 para operação PI	s
l_{1_PI}	distância do último veículo parado na fila da via 1 até a interseção para operação PI [m]	m
r_{2_PI}	tempo de vermelho da via 2 para operação PI	s
t_{p_PC}	instante de partida do ônibus do ponto para operação PC	s
r_{1_PC}	tempo de vermelho da via 1 para operação PC	s
l_{1_PC}	distância do último veículo parado na fila da via 1 até a interseção para operação PC	m
r_{1min}	tempo de vermelho mínimo da via 1 no primeiro ciclo, para evitar resíduo de fila na via 2 no segundo ciclo (com r_{1nom} no segundo ciclo)	s

Capítulo 4

f	função custo do sistema BRT para o horizonte de predição considerado	s
i	índice dos ônibus, $i=1,\dots,n_I$	
n_i	numero de ônibus do sistema BRT	
I	conjunto de ônibus do sistema BRT, $I=\{1,\dots,n_I\}$	
k	índice dos pontos, $k=1,\dots,n_K$	
n_k	numero de pontos do sistema BRT	
K	conjunto de pontos do sistema BRT, $K=\{1,\dots,n_K\}$	
N_i	conjunto de pontos pertencentes ao horizonte de predição do ônibus i	
n_N	número de pontos dentro do horizonte de predição N_i dos ônibus	
N	seqüência do número de pontos dentro do horizonte de predição N_i do ônibus i , $N=\{1,\dots,n_N\}$	
λ_k	taxa de chegada de passageiros no ponto k	passageiros/s
$d_{i,k}$	instante de partida do ônibus i do ponto k	S
q_k	fração de passageiros embarcados que desembarcam no ponto k	
$l_{i,k}$	número de passageiros embarcados no ônibus i quando da partida do ponto k	
$h_{i,k}$	tempo de retenção (ação de controle) do ônibus i no ponto k	S
$s_{i,k}$	maior valor dentre os tempos de embarque e desembarque de passageiros do ônibus i no ponto k	s
$a_{i,k}$	instante de chegada do ônibus i ao ponto k	S
r_k	tempo de viagem dos ônibus entre os pontos $k-1$ e k	S
$s_{i,k}^{emb}$	tempo de embarque de passageiros no ônibus i e ponto k	S
$s_{i,k}^{des}$	tempo de desembarque de passageiros do ônibus i no ponto k	S
C_0	tempo para o início do embarque e desembarque de passageiros a partir da chegada do ônibus ao ponto	s
C_1	tempo gasto para o embarque de cada passageiro	s/passageiro
C_2	tempo gasto para o desembarque de cada passageiro	s/passageiro

e_{min}	espaçamento temporal mínimo permitido entre os ônibus	S
$h_{máx}$	máximo tempo de retenção dos ônibus nos pontos	S
$N_i^{N=1}$	primeiro ponto k ($N=1$) do horizonte de predição N_i do ônibus i	
m	índice da volta dentro do circuito fechado BRT	
ω	índice para representação da volta m associada ao ponto k	
$d_{i,\omega}$	instante de partida do ônibus i do ponto k e volta m	S
$a_{i,\omega}$	instante de chegada do ônibus i ao ponto k e volta m	S
$l_{i,\omega}$	número de passageiros embarcados no ônibus i quando da partida do ponto k e volta m	
$h_{i,\omega}$	tempo de retenção do ônibus i no ponto k e volta m [s]	S
$s_{i,\omega}$	maior valor dentre os tempos de embarque e desembarque de passageiros do ônibus i no ponto k e volta m	s
$s_{i,\omega}^{emb}$	tempo de embarque de passageiros no ônibus i , ponto k e volta m	S
$s_{i,\omega}^{des}$	tempo de desembarque de passageiros do ônibus i , ponto k e volta m	S
S_i	conjunto de pontos do ônibus i com valores iniciais $d_{i,\omega}^*$ e $l_{i,\omega}^*$ conhecidos	
$d_{i,\omega}^*$	instante de partida do ônibus i do ponto k e volta m com valor inicial conhecido	s
$l_{i,\omega}^*$	número de passageiros embarcados no ônibus i quando da partida do ponto k e volta m com valor inicial conhecido	
$y_{i,\omega}$	variável binária	{0,1}
C_3	constante positiva suficientemente grande	
$s_{i,\omega}^{+emb}$	limite superior para $s_{i,\omega}^{emb}$	s
$s_{i,\omega}^{+des}$	limite superior para $s_{i,\omega}^{des}$	s
$s_{i,\omega}^{-emb}$	limite inferior para $s_{i,\omega}^{emb}$	s
$s_{i,\omega}^{-des}$	limite inferior para $s_{i,\omega}^{des}$	s
P	índice da iteração	
ε	tolerância máxima	s

Capítulo 5

$d_{i,\omega}$	instante de partida do ônibus i do ponto k e volta m (via MSAM)	s
R_k	tempo de viagem dos ônibus do ponto k até a interseção k imediatamente a jusante	s
F_{BRT}	duração da fase BRT	s
$f_{i,\omega}^{1inc}$	instante do início da fase BRT para ônibus i , ponto k , volta m e interseção k , para prioridade incondicional	s
$f_{i,\omega}^{2inc}$	instante do final da fase BRT para ônibus i , ponto k , volta m e interseção k , para prioridade incondicional	s
$N_i^{N=1}$	primeiro ponto k ($N=1$) do horizonte de predição N_i do ônibus i	
K^s	conjunto de pontos do sistema BRT com interseção semaforizada imediatamente a jusante	
n	índice do ciclo equivalente à determinada fase BRT	
$\delta_{n,kmin}$	instante mínimo de partida dos ônibus do ponto k , interseção k e ciclo n	s
$\delta_{n,kmax}$	instante máximo de partida dos ônibus do ponto k , interseção k e ciclo n	s
$f_{n,k}^1$	instante do início da fase BRT no ciclo n da interseção k	s
$f_{n,k}^2$	instante do final da fase BRT no ciclo n da interseção k	s
f_{ant}	tempo máximo para antecipação da fase BRT	s
f_{ext}	tempo máximo para extensão da fase BRT	s
N^C	horizonte de ciclos n suficientemente grande para abranger todos os N_i dos ônibus i	
$d_{i,\omega}^{est-h=0}$	valores estimados via MSAM para $d_{i,\omega}$ (com $h_{i,\omega}=0$)	s
$n_{i,\omega}^{cond}$	ciclo n associado a determinado $d_{i,\omega}^{est-h=0}$ para prioridade condicional	
$d_{i,\omega}^{cond}$	instante de partida do ônibus i , ponto k e volta m com interseção semaforizada k imediatamente a jusante, para prioridade condicional	s
C	tempo de ciclo da sinalização semafórica ou tempo entre duas fases BRT consecutivas para uma mesma interseção semaforizada k	s
$f_{i,\omega}^{1cond}$	instante do início da fase BRT para ônibus i , ponto k , volta m e	

	interseção k para prioridade condicional	s
$f_{i,\omega}^{2\ cond}$	instante do final da fase BRT para ônibus i , ponto k , volta m e interseção k para prioridade condicional	s
$\delta_{n,kmin}^0$	instante mínimo de partida dos ônibus do ponto k , interseção k e ciclo n para prioridade nula	s
$\delta_{n,kmax}^0$	instante máximo de partida dos ônibus do ponto k , interseção k e ciclo n para prioridade nula	s
$n_{i,\omega}^{cond=0}$	ciclo n associado a determinado $d_{i,\omega}^{est-h=0}$ para prioridade nula	
$d_{i,\omega}^{cond=0}$	instante de partida do ônibus i , ponto k e volta m para prioridade nula	s
$f_{i,\omega}^{1cond=0}$	instante do início da fase BRT para ônibus i , ponto k , volta m interseção k para prioridade nula	s
$f_{i,\omega}^{2cond=0}$	instante do final da fase BRT para ônibus i , ponto k , volta m e interseção k para prioridade nula	s

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os meios de transporte sempre tiveram um papel de destaque na história da humanidade, principalmente a partir da segunda metade do século XX, período caracterizado pelo rápido crescimento do número de veículos e da demanda por transporte em geral. Este crescente aumento da necessidade e desejo de mobilidade de pessoas e mercadorias, com o conseqüente aumento da frota de veículos, combinado com áreas urbanas já bastante adensadas e limitações na expansão das vias públicas, leva a um cenário de saturação e colapso no fluxo de veículos nestas vias. Surge assim um problema típico, cada vez mais presente nas cidades de grande e médio porte do Brasil e do mundo, o congestionamento de veículos nas áreas urbanas. Como conseqüência destes congestionamentos chega-se a custos crescentes em termos de atrasos de veículos e pessoas, poluição ambiental, gasto de combustível, desgaste de equipamentos, acidentes de trânsito, níveis de *stress*, etc.

A expansão da oferta de infra-estrutura do sistema viário urbano, dada uma série de limitações de ordem econômica, ecológicas e de espaço físico, muitas vezes não consegue acompanhar o ritmo de crescimento urbano e da motorização. Neste contexto, um sistema de transporte público urbano, com um grande número de usuários, permite uma redução significativa do congestionamento de veículos nas vias urbanas, com conseqüente redução dos custos acima citados. Assim, o transporte público urbano torna-se essencial para a preservação e revitalização das áreas urbanas, representando um serviço vital com enorme impacto e significado social.

Uma política de transporte que tenha como um dos objetivos o aumento da demanda pelo transporte público, em detrimento do transporte individual, deve implementar uma série de ações que incentivem e facilitem esta mudança de perfil. Estas ações podem ser classificadas como ações restritivas e ações facilitadoras, para os usuários do transporte individual e transporte público respectivamente. Como exemplo de ações restritivas pode-se citar a cobrança de pedágio urbano, cobrança e ou diminuição de vagas de estacionamento nas vias públicas, rodízio de placas de automóveis de passeio, etc.

Como ações facilitadoras podem-se citar o subsídio ou redução das tarifas e aumento da qualidade, eficiência e segurança do transporte público.

Dentre as várias modalidades de transporte público urbano como metrô, trem, VLT (veículo leve sobre trilhos) e ônibus, esta última apresenta características de alta flexibilidade e baixo custo de implantação e manutenção quando comparado com o transporte sobre trilhos. Tais características tornam o transporte público via ônibus amplamente empregado nas cidades de pequeno, médio e grande porte, tornando-se muitas vezes a única opção economicamente viável.

Como fator negativo observado num grande número de sistemas de transporte público via ônibus, caso típico das cidades brasileiras, pode-se citar, além da escassez de recursos, a falta de planejamento e operação adequados do serviço de transporte. Esta falta se reflete na precariedade de infra-estrutura (vias, pontos, ônibus, sinalização, sistema de informação ao usuário, etc.) e em problemas relacionados ao fluxo ou movimentação dos ônibus (plano de horários, espaçamentos, etc.). Ou seja, estes fatores negativos contribuem de forma direta e significativa para uma opção pelo transporte individual em detrimento ao transporte público.

1.1 Planejamento e Operação do Sistema de Transporte Público

O planejamento e operação do transporte público, de forma geral e no caso aqui analisado, modal ônibus, é um problema de grande dimensão e complexidade (Desaulniers e Hickman, 2003), envolvendo os usuários, a frota de ônibus, infra-estrutura, motoristas, operadores, etc., que interagem entre si, cada qual com suas particularidades.

O principal objetivo das agências de transporte público é oferecer um serviço confiável, pontual e de baixo custo, podendo-se incluir ainda o aumento da mobilidade da população, a redução de congestionamentos e emissão de poluentes, mínimo tempo de espera e de viagem dos usuários e outros (Zolfaghari *et al.*, 2004). Estes objetivos devem ser considerados quando do processo de planejamento e operação do sistema de transporte público, que pode ser classificado conforme indicado na Figura 1.1 e descrito abaixo (Desaulniers e Hickman, 2003):

- Planejamento estratégico: envolve a especificação das rotas e da rede do serviço de transporte público com o objetivo de suprir a demanda de passageiros. A especificação das rotas e da rede do serviço baseia-se principalmente nas matrizes

origem-destino dos usuários do sistema de transporte público. O planejamento estratégico visa maximizar a qualidade do serviço dentro das restrições orçamentárias.

- Planejamento tático: envolve a especificação do serviço de transporte, mais especificamente a frequência dos ônibus ao longo das rotas e ou o plano de horários. Os dados necessários são obtidos numa base sazonal com eventual atualização das especificações. O objetivo também está focado na qualidade dos serviços.
- Planejamento operacional: envolve a operação do transporte público visando oferecer os serviços propostos a um custo mínimo. Inclui uma variedade de problemas como: plano de horário dos motoristas dos ônibus, estacionamento e despacho dos ônibus das garagens, plano de manutenções, etc. Estes problemas são solucionados em intervalos distintos como, por exemplo, plano de horário mensal para os motoristas e diário para estacionamento e despacho dos ônibus das garagens. O objetivo é a minimização do custo total da operação.
- Operação em tempo real: gerencia as possíveis perturbações no plano operacional, utilizando estratégias de controle em tempo real, com o objetivo de otimizar o desempenho do sistema de transporte. Desvios no serviço impõem custos aos prestadores do serviço na forma de queda de produtividade e aos usuários na forma de aumento do tempo de viagem, aumento no tempo de espera nos pontos, incertezas nos horários, etc.

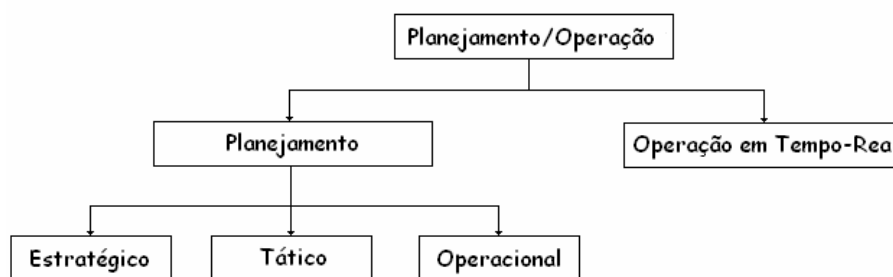


Figura 1.1. Classificação do processo de planejamento e operação do sistema de transporte público

Enquanto os planejamentos estratégico, tático e operacional são responsáveis em solucionar problemas de natureza persistente e contínua, através da reestruturação de rotas,

planos de horários, espaçamento temporal entre ônibus (*headway*), etc., a operação tempo real têm por objetivo responder de forma imediata a possíveis e esporádicas perturbações no serviço, de forma a otimizar o desempenho do sistema de transporte (Turnquist e Blume, 1980).

A operação inadequada do serviço de transporte público, caso comumente verificado na prática, se manifesta na forma de desvios no plano de horários e ou espaçamento entre os ônibus (tendência de agrupamento dos ônibus), o que por sua vez aumenta o tempo de espera e viagem dos usuários e os custos de operação do sistema de transporte. Muitas operadoras, com o objetivo de corrigir esta ineficiência operacional, aumentam o número de ônibus em serviço, o que pode agravar ainda mais o problema e aumentar os congestionamentos.

Uma solução para o problema de operação dos sistemas de transporte público é a implantação de sistemas ou estratégias de controle tempo real desta operação. Estas estratégias geralmente pressupõem informações em tempo real da dinâmica do sistema de transporte, como o número de passageiros nos pontos e embarcados nos ônibus, instante de partida dos ônibus dos pontos, aderência ao plano de horários e ou espaçamento nominal, etc., e dados históricos atualizados como a taxa de chegada de passageiros nos pontos, fração de passageiros que desembarcam dos ônibus em cada ponto, tempo de viagem dos ônibus entre pontos e outros. As estratégias de operação tempo real mais comumente empregadas são descritas e analisadas no Capítulo 2. Para um serviço normal sujeito a pequenos desvios e pequenas perturbações no plano de horários ou espaçamento entre ônibus, as estratégias mais empregadas são a prioridade para ônibus nas interseções sinalizadas e a retenção (*hold*) dos ônibus nos pontos (Zolfaghari *et al.*, 2004). Este trabalho está focado nestas duas estratégias.

As estratégias de operação tempo real para operação de sistemas de transporte público, onde se incluem as estratégias de prioridade e retenção, devem contribuir para os objetivos de operação das várias agências envolvidas no sistema de tráfego: agência de controle de tráfego, agência de transporte público, agência ambiental e outras. Alguns objetivos, como por exemplo, a diminuição da emissão de poluentes, são comuns para as agências de tráfego, transporte público, ambiental, etc. Outros, como a diminuição dos custos de operação do transporte público, são de interesse específico da agência de transporte público. Outros ainda, como a redução dos atrasos dos veículos de passeio, ônibus e pedestres, são particularmente conflitantes. Neste contexto, as estratégias de

controle da operação tempo real do sistema de transporte público devem considerar os possíveis conflitos e diferentes objetivos entre as várias agências envolvidas.

As várias estratégias de prioridade e retenção existentes, para sistemas de transporte público via ônibus (Lin *et al.*, 1995; Skabardonis *et al.*, 1998b; Eberlein *et al.*, 1999; O’Dell e Wilson, 1999; Mirchandani *et al.*, 2001; Eberlein *et al.*, 2001; Sun e Hickman, 2001; Zhao *et al.*, 2001; Dion e Hellinga, 2002; Sun e Hickman, 2004; Zolfaghari *et al.*, 2004, Puong e Wilson, 2004 e outros), apresentam limitações relacionadas com o modelo utilizado e ou com a solução do problema em tempo real. De forma geral, uma solução tempo real eficiente implica na utilização de um modelo limitado e um modelo mais realista implica numa solução tempo real pouco eficiente e portanto, não aplicável num cenário real. Também vale destacar que a maioria das estratégias existentes são exclusivas em termos do controle de prioridade ou do controle de retenção.

1.2 Sistema de Transporte Urbano tipo BRT

Uma solução cada vez mais adotada, no Brasil e no mundo, visando um melhor serviço de transporte público urbano, é a implantação de sistemas BRT (do inglês *bus rapid transit*). O sistema BRT é basicamente um sistema de transporte público por ônibus com uma série de diferenciais que visam agregar qualidade e eficiência ao serviço. Segundo definição do *The National Bus Rapid Transit Institute* (www.nbrti.org) dos EUA, BRT é um sistema de transporte rápido baseado em ônibus que oferece um serviço altamente flexível e faz uso de tecnologias avançadas para maior qualidade e diminuição do atraso dos usuários. Já segundo definição no Manual de BRT, publicado pelo Ministério das Cidades (tradução do *Bus Rapid Transport Planning Guide*, publicado por *Institute for Transportation & Development Policy*), BRT é um sistema de transporte de ônibus que proporciona mobilidade urbana rápida, confortável e com custo eficiente através da provisão de infra-estrutura segregada com prioridade de passagem, operação rápida e freqüente e excelência em marketing e serviço ao usuário.

Podem-se citar como principais diferenciais, nem todos obrigatórios e ou exclusivos, do sistema BRT em relação ao transporte convencional por ônibus (Miller *et al.*, 2004):

- faixas segregadas para os ônibus;
- serviço com alta freqüência de ônibus;

- plataforma de embarque e desembarque no nível do piso dos ônibus;
- bilhetagem eletrônica nos pontos;
- prioridade para os ônibus nas interseções;
- sistema de informação aos usuários;
- ônibus com alta capacidade de passageiros do tipo articulado ou bi-articulado;
- utilização de sistemas de transporte inteligente (STI ou do inglês “ITS”);
- controle tempo real do plano de horários e ou espaçamento entre ônibus;
- diferenciais ergonômicos e estéticos nos pontos e nos ônibus, etc.

São estes diferenciais que combinados e somados permitem uma maior qualidade e eficiência do sistema BRT e um incentivo à sua utilização, portanto, de encontro com o objetivo de atração do usuário do transporte individual para o transporte público. De forma simplificada, pode-se resumir a filosofia de um sistema BRT como: “pense metrô, faça ônibus”.

Dada a necessidade da qualidade diferenciada do sistema BRT em termos de infraestrutura e operação do sistema, um controle eficiente da operação em tempo real se faz imprescindível. O modelo de um sistema BRT se distingue de um sistema de transporte convencional por ônibus basicamente pela presença quase obrigatória de STI e faixas segregadas para os ônibus. Estas características diferenciadas tornam o sistema de transporte público tipo BRT ideal para aplicações de estratégias de controle tempo real na operação do sistema.

1.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é a apresentação e análise de novos modelos de estratégias de prioridade e retenção, para o controle em tempo real da operação de sistemas de transporte público por ônibus e, caso específico, de sistemas do tipo BRT. Como objetivos específicos podem-se citar:

- uma revisão bibliográfica das principais estratégias de controle tempo real para operação de sistemas de transporte público por ônibus, com ênfase nas estratégias de prioridade e retenção;

- apresentação e análise de uma estratégia integrada de controle adaptativo da sinalização de uma interseção isolada, com possibilidade de prioridade, e controle da partida do ônibus do ponto próximo e a montante da interseção;
- apresentação, análise e validação de um modelo ampliado e procedimento de solução para o problema de controle de retenção, em nível de rede, para sistemas de transporte público por ônibus e sistemas BRT;
- apresentação e análise de um modelo integrado de prioridade e retenção, para o problema de controle da interseção entre as vias exclusivas de sistemas BRT com as vias de tráfego convencional.

1.4 Estrutura do Trabalho de Tese

Este trabalho está organizado na forma descrita a seguir. O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica das várias estratégias de controle tempo real da operação de sistema de transporte público urbano por ônibus, com ênfase nas estratégias de prioridade e retenção. O capítulo 3 apresenta uma nova estratégia de prioridade para ônibus em interseções isoladas, baseada no controle integrado da temporização semafórica e da partida dos ônibus do ponto próximo à interseção. O capítulo 4 apresenta um modelo ampliado e procedimento de solução, para o problema de controle de retenção em tempo real, de sistemas de transporte público via ônibus e sistemas BRT. O capítulo 5 apresenta uma estratégia integrada de prioridade e retenção, para controle do fluxo de veículos nas interseções entre as vias exclusivas do sistema BRT e as vias de tráfego convencional. A estratégia utilizada, baseada no modelo e procedimento de solução apresentados no capítulo 4, integra o controle de prioridade dos ônibus (nível local), através do controle da temporização semafórica e inserção das fases BRT, e o controle de retenção dos ônibus nos pontos (nível global). O capítulo 6 apresenta as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE PÚBLICO

2.1 Introdução

Este capítulo trata da operação tempo real de sistemas de transporte público via ônibus, mais especificamente das estratégias de prioridade e retenção, aqui discutidas de forma mais detalhada. Entretanto, é importante contextualizar estas estratégias e o problema foco deste trabalho dentro do tema geral de operação de sistemas de transporte público. Assim, são descritas a seguir as principais características da operação tempo real dos sistemas de transporte público por ônibus.

2.2 Características da Operação Tempo Real de Sistemas de Transporte Público

O principal objetivo da operação tempo real de sistemas de transporte público é otimizar o desempenho do sistema de transporte público, ou seja, corrigir possíveis desvios ou perturbações no serviço para que o sistema volte a operar de acordo com o especificado no planejamento operacional.

Os desvios ou perturbações no serviço podem ter origem interna ou externa ao sistema de transporte público (Strathman *et al.*, 2001). Desvios internos são causados por fatores tais como comportamento não previsível dos motoristas dos ônibus, especificação imprópria do plano de horários ou espaçamento entre ônibus (*headway*), erro nas estimativas associadas ao número de passageiros, ao tempo de viagem dos ônibus, etc. Desvios externos são causados por fatores tais como congestionamentos e acidentes no tráfego, semáforos, interferência entre ônibus e estacionamentos, quebra de ônibus, condições climáticas, etc.

As estratégias de operação tempo real para sistemas de transporte público podem ser classificadas em função do local de implementação do controle e em função da magnitude dos desvios ou perturbações a serem controlados. Quanto ao local de implementação, as estratégias são classificadas como (Zolfaghari *et al.*, 2004; Fu *et al.*, 2003):

- controle nos pontos ou estações de embarque e desembarque de passageiros;
- controle entre pontos ou estações de embarque e desembarque de passageiros;
- outros locais de controle.

As estratégias de controle nos pontos ou estações de embarque e desembarque são utilizadas basicamente para reduzir o tempo de espera dos passageiros nos pontos e estações e evitar o agrupamento entre os ônibus (efeito *bunching*) ao longo da rota. As estratégias de controle entre pontos ou estações de embarque e desembarque são utilizadas basicamente para reduzir o tempo de viagem dos ônibus, o que por sua vez diminui o tempo de viagem dos passageiros embarcados.

O critério de magnitude dos desvios ou perturbação sobre o serviço é relativo, e depende dos valores de espaçamento e ou plano de horários utilizados como referência. Segundo este critério, as estratégias são classificadas como (Desaulniers e Hickman, 2003):

- controle de pequenos desvios no plano de horários ou espaçamento entre ônibus;
- controle de grandes desvios no plano de horários ou espaçamento entre ônibus.

2.2.1 Estratégias de Controle Tempo Real

As várias estratégias de operação tempo real para sistemas de transporte público são descritas de forma resumida a seguir.

- Retenção ou *holding*: consiste em reter ou atrasar o ônibus por determinado tempo num ponto ou estação quando este estiver adiantado em relação ao plano de horários ou com o espaçamento (*headway*) abaixo do especificado. A retenção pode reduzir significativamente a variação no espaçamento entre os ônibus e com isto reduzir o tempo médio de espera dos passageiros nos pontos. Como desvantagem pode ocorrer um aumento no tempo de viagem do ônibus e conseqüentemente dos passageiros embarcados.
- Salto de pontos ou *stop skipping*: consiste no ônibus não parar em determinados pontos, de preferência pontos com baixa demanda, para adiantar o ônibus quando este estiver atrasado em relação ao plano de horários. Reduz o tempo de viagem do ônibus, o tempo de viagem dos passageiros embarcados no ônibus e o tempo de

espera dos passageiros nos pontos a jusante dos pontos não atendidos. Entretanto, aumenta o tempo de espera dos passageiros nos pontos não atendidos e o tempo de viagem dos passageiros que desembarcaram antes e fora do ponto inicialmente previsto.

- Retorno antecipado ou *short turning*: consiste em forçar o retorno do ônibus antes de completar o itinerário. A estratégia permite diminuir a variação no espaçamento entre os ônibus e o tempo de espera dos passageiros nos pontos no sentido oposto ao sentido inicial da rota. Entretanto, há um aumento no tempo de viagem dos passageiros que desembarcaram do ônibus quando da mudança de sentido na rota.
- Sempre avante ou *dead heading*: consiste em despachar um ônibus vazio que roda através de vários pontos sem parar, até alcançar um ponto especificado. A estratégia permite corrigir irregularidades no espaçamento entre os ônibus e reduzir o tempo de espera dos passageiros no ponto especificado e a jusante deste.
- Expresso ou semi-expresso: semelhante à estratégia salto de ponto onde vários pontos seguidos não são atendidos, com a diferença de que o passageiro tem prévio conhecimento do itinerário.
- Ônibus reserva ou extra: utilizado quando há uma interrupção inesperada no serviço como, por exemplo, quebra de algum ônibus. Tem por objetivo suprir uma demanda específica, como passageiros esperando num ponto não atendido e prevenir irregularidades no espaçamento entre ônibus. Entretanto, impõe custos adicionais para o operador do transporte público.
- Prioridade para ônibus nas interseções sinalizadas: implica no controle da temporização semafórica das interseções para favorecer a passagem e evitar a parada dos ônibus, o que reduz o atraso dos ônibus e dos passageiros embarcados.

As estratégias tempo real para operação de sistemas de transporte público, acima descritas, são classificadas em função do local de implementação de controle e magnitude dos desvios a serem controlados, conforme apresentado na Figura 2.1.

2.2.2 Características das Estratégias de Controle Tempo Real

As estratégias de controle tempo real para operação de sistemas de transporte público descritas anteriormente, foram testadas e analisadas em diversos trabalhos, com conclusões convergindo para o que é citado a seguir.

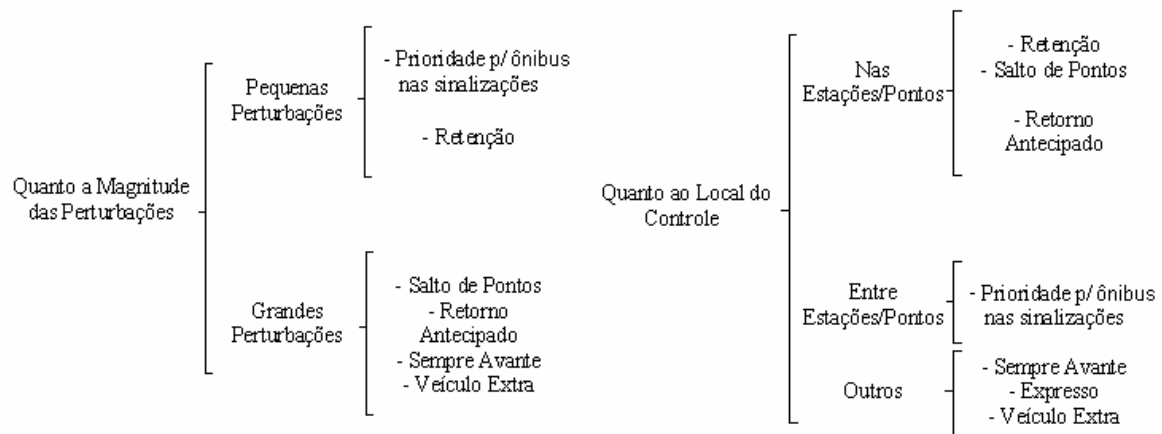


Figura 2.1. Classificação das principais estratégias de controle tempo real para sistemas de transporte público

- A utilização de estratégias do tipo salto de ponto, sempre avante e retorno antecipado, em virtude da reação negativa dos usuários em relação ao salto de pontos e necessidade de desembarque “forçado” do ônibus, não são bem vistas pelas agências de transporte público (Strathman *et al.*, 2001).
- A utilização da estratégia salto de ponto aumenta o tempo de espera dos passageiros nos pontos não atendidos e portanto, deve ser evitada (Lin *et al.*, 1995).
- A estratégia de retenção é mais eficaz que as estratégias do tipo sempre avante e expresso (Eberlein *et al.*, 2001; Zolfaghari *et al.*, 2004).
- A estratégia de retenção diminui a variação do espaçamento entre os ônibus e melhora a aderência ao plano de horários, o que diminui o custo por passageiro e portanto o desempenho do serviço de transporte público (Sun e Hickman, 2004).
- Cerca de 15% do tempo de viagem dos ônibus num sistema de transporte público é gasto com paradas nas sinalizações (Baker *et al.*, 2002), tempo este que pode ser reduzido com a implantação de estratégias de prioridade para ônibus nas interseções sinalizadas.
- Estratégia de prioridade para ônibus tem sido implementadas com sucesso na Europa e EUA desde 1968, com resultados típicos do tipo (Baker *et al.*, 2002): redução do tempo de viagem dos ônibus entre 6% a 49%; aumento entre 0% a 2,5% no tempo de viagem dos veículos de passeio; sem indícios de aumento do atraso dos pedestres. Importante salientar que os resultados variam conforme o sistema de detecção e controle, estratégia de prioridade utilizada, procedimento de coleta de

dados, volume de tráfego e combinação de estratégias de prioridade com outros tratamentos como pistas exclusivas para ônibus, possibilidade do ônibus ultrapassar filas, etc.

Assim, para um serviço normal sujeito a pequenos desvios e pequenas perturbações no plano de horários ou espaçamento entre ônibus, as estratégias mais empregadas são a prioridade para ônibus nas interseções sinalizadas e a retenção ou *holding* dos ônibus nos pontos e estações (Zolfaghari *et al.*, 2004).

Neste trabalho serão analisadas mais detalhadamente as estratégias de retenção e prioridade, dadas as justificativas acima e sua utilização nos modelos e estratégias desenvolvidas nos capítulos 3, 4 e 5. As estratégias de retenção e prioridade são descritas e analisadas nos itens a seguir.

2.3 Estratégia de Controle Tipo Retenção

A necessidade de controlar o movimento dos ônibus deve-se à instabilidade natural destes em relação ao plano de horários e aos espaçamentos (*headway*). Esta instabilidade é causada por variações probabilísticas no tempo de embarque e desembarque de passageiros (devido a variações no número de passageiros) e à velocidade média dos ônibus ao longo da rota (devido a variações no volume de tráfego, semáforos, etc.) (Lin *et al.*, 1995). Esta instabilidade faz com que os ônibus acabem se agrupando e formando pelotões (efeito *bunching*), o que aumenta o tempo de espera e viagem dos usuários do sistema de transporte.

O efeito *bunching* pode ser ilustrado através do seguinte exemplo: supor que determinado ônibus sofra um atraso, assim, devido ao acúmulo de passageiros no próximo ponto, o tempo de embarque de passageiros aumenta, o que atrasa mais este ônibus. Este efeito é cumulativo nos pontos seguintes e o ônibus sofrerá ainda mais atrasos. O ônibus seguinte, devido ao atraso do ônibus anterior, encontrará um menor número de passageiros nos pontos, o que diminui o tempo de embarque de passageiros, resultando num adiantamento deste ônibus, aproximando-o do ônibus anterior. Este efeito se propaga para os demais ônibus e pontos da rota gerando o agrupamento dos ônibus ou efeito *bunching*.

Osuna e Newell (apud Bukkapatnam *et al.*, 2003) concluíram que o tempo de espera dos passageiros nos pontos diminui com o aumento da regularidade do espaçamento

entre os ônibus, sendo esta conclusão a base para as estratégias de controle do espaçamento entre ônibus via retenção nos pontos.

A possível retenção dos ônibus nos pontos, que a princípio sugere um aumento no atraso médio dos passageiros, pode vir a diminuir este atraso. Entretanto, a retenção tende a aumentar o tempo de viagem dos ônibus e conseqüentemente dos passageiros embarcados, o que deve ser considerado no critério de decisão.

2.3.1 Tipos de Estratégias de Retenção

Existem vários tipos de estratégia de retenção e a escolha da mais apropriada depende de fatores como o número de usuários do sistema de transporte, da frequência do serviço, das causas dos desvios no serviço, etc. (Hickman, 2001; Desaulniers e Hickman, 2003). Muitas vezes a técnica de retenção é aplicada utilizando-se critérios subjetivos de julgamento do motorista ou de um supervisor (Eberlein *et al.*, 2001), geralmente sem muito sucesso.

Em relação à lógica de controle utilizada, as estratégias de retenção podem ser diferenciadas em (Lin *et al.*, 1995):

- controle baseado no espaçamento ou *headway*: implica na manutenção do espaçamento nominal entre sucessivos ônibus para determinado ponto, ou do espaçamento ótimo entre os vários ônibus do sistema de transporte público;
- controle baseado no plano de horários: implica na manutenção do plano de horários dos ônibus. No controle baseado no plano de horários o objetivo é cumprir os horários estabelecidos, indiferente ao problema do espaçamento entre ônibus. No entanto, um controle do plano de horários leva a um controle indireto do espaçamento.

As estratégias de retenção baseadas no controle do espaçamento são mais indicadas para rotas operando com espaçamentos pequenos entre ônibus (alta frequência do serviço). Para espaçamentos maiores é mais comum a utilização de estratégias de retenção baseadas no controle do plano de horários (Abkowitz e Engelstein, 1984; Lin *et al.*, 1995).

Estas duas lógicas de controle de retenção podem ser implementadas na forma binária ou proporcional. Na forma binária a retenção ocorre se, encerrado o processo de embarque e desembarque de passageiros no ponto, o espaçamento entre o ônibus e o

anterior estiver abaixo do especificado (caso *headway*) ou se o ônibus estiver adiantado em relação ao plano de horários (caso plano de horários). A retenção ocorre até que se alcance os valores especificados. Caso o espaçamento estiver acima do limite especificado ou o ônibus estiver dentro dos limites especificados para o plano de horários ele é despachado imediatamente após encerrado o processo de embarque e desembarque de passageiros. Na forma proporcional o tempo de retenção é função da magnitude do desvio (multiplicação do desvio por uma constante de valor especificado) em relação ao espaçamento nominal entre os ônibus ou em relação ao plano de horários. Ou seja, quanto menor o espaçamento entre os ônibus em relação ao valor nominal ou mais adiantado o ônibus em relação ao plano de horários, maior o tempo de retenção.

Outra forma de implementação das lógicas de controle de retenção é a retenção tipo “PREFOL” (Strathman *et al.*, 2001), que consiste em reter o ônibus no ponto até que o espaçamento em relação ao ônibus anterior esteja o mais próximo possível do espaçamento em relação ao ônibus seguinte. Além da informação do instante de partida do ônibus anterior do ponto em questão é necessária uma predição do instante de chegada do ônibus seguinte a este ponto, o que aumenta a complexidade do controle.

Tipicamente o objetivo destas estratégias é minimizar o tempo de espera dos passageiros nos pontos à jusante do ponto de controle ou uma combinação deste com a minimização do tempo de viagem dos passageiros embarcados. Conforme citado por Eberlein *et al.* (2001), vários estudos a partir de 1972 abordaram as estratégias de retenção citadas acima. De forma geral estas estratégias não levam em consideração informações em tempo real do sistema de transporte público, ignoram os efeitos do tempo de embarque e desembarque de passageiros sobre plano de horários e o espaçamento entre ônibus e desconsideram várias restrições relacionadas ao tempo de partida dos ônibus dos pontos e ultrapassagem entre estes. Devido à complexidade do problema de retenção, somente modelos analíticos bastante simplificados foram utilizados nestas estratégias. Os resultados apresentados concluem que estes modelos utilizados para o controle de retenção são pouco eficientes.

Nos sistemas de controle de tráfego e de transporte público modernos, com a utilização de tecnologias STI (sistemas de transporte inteligentes) como LAV (localização automática de veículos), IAV (identificação automática de veículos), CAP (contagem automática de passageiros) e outras, uma abordagem tempo real, que faz uso destas tecnologias, se faz possível e desejável. Neste contexto surgem as estratégias de retenção

baseadas em modelos de programação matemática, que utilizam como variável de decisão o tempo de retenção dos ônibus nos pontos e, como função custo a ser minimizada, o tempo de atraso dos passageiros nos pontos e ou embarcados. Estes modelos geralmente fazem uso de dados históricos e ou em tempo real relativos ao sistema de transporte público como o tempo de viagem dos ônibus entre pontos, taxa de chegada de passageiros nos pontos, fração de passageiros que desembarcam nos pontos, etc.

2.3.2 Estratégia de Controle de Retenção baseada no Espaçamento

Tipicamente, um espaçamento entre ônibus de 12 a 13 minutos, marca a transição entre os modelos de chegada dos passageiros nos pontos (Bukkapatnam *et al.*, 2003). Abaixo deste tempo o passageiro tem um comportamento de chegada ao ponto que não depende do plano de horários e, acima deste tempo, o comportamento dos passageiros leva em conta o plano de horários. Ou seja, para rotas que operam com pequenos espaçamentos entre ônibus ou com alta frequência no serviço, os passageiros estão mais preocupados com a regularidade do que com a pontualidade no serviço. Para rotas que operam com grandes espaçamentos ou com baixa frequência no serviço, a preocupação está relacionada com a pontualidade no serviço (Abkowitz e Engelstein, 1984).

Portanto, o controle do espaçamento é mais indicado para rotas operando com pequenos e uniformes *headways*. O controle do plano de horários é mais apropriado para rotas com longos e irregulares *headways* (Abkowitz e Engelstein, 1984; Lin *et al.*, 1995). Esta característica do comportamento dos passageiros, independente do plano de horários, implica na utilização de um modelo de chegada dos passageiros nos pontos representado por uma taxa constante.

O primeiro trabalho de controle do espaçamento entre ônibus via estratégia de retenção, utilizando um modelo de programação matemática, foi apresentado por Eberlein *et al.* (1999), podendo-se citar ainda os trabalhos de O' Dell e Wilson (1999), Eberlein *et al.* (2001), Sun e Hickman (2004) e Zolfaghari *et al.* (2004), dentre outros. No trabalho apresentado por Eberlein *et al.* (2001), as informações são baseadas em dados tempo real, como o instante de partida dos ônibus do último ponto visitado, número de passageiros embarcados nos ônibus e dados históricos como taxa de chegada de passageiros nos pontos, tempo de viagem dos ônibus entre pontos, fração de passageiros que desembarcam em cada ponto, etc. O modelo, baseado nas características de um sistema de transporte sobre trilhos, é completamente determinístico, e inclui o efeito do tempo de embarque e

desembarque de passageiros na descrição, através de um modelo analítico, da movimentação dos ônibus. O controle de retenção só é exercido num ponto, escolhido dentro do conjunto de pontos da rota, para um horizonte ou número limitado de ônibus a montante deste ponto. Considera-se também um conjunto de pontos de impacto que vai do ponto de controle até o próximo ponto ou estação com controle do plano de horários. A variável de decisão é o tempo de retenção dos ônibus, pertencentes ao horizonte selecionado, no ponto de controle. No modelo utilizado existe uma limitação no número de ônibus (horizonte limitado) e um único ponto de controle. Por simplificação, o modelo não considera o atraso dos passageiros embarcados nos ônibus, o que garante a convexidade da função custo. A presença de restrições não lineares dificulta a solução do problema (programação não linear), que é resolvido através de um procedimento inicial de redução do modelo.

O trabalho apresentado por Zolfaghari *et al.* (2004), seguindo a mesma linha, incorpora alguns aspectos específicos do sistema de transporte urbano por ônibus, como por exemplo, a limitação de capacidade dos ônibus. As informações também são baseadas em dados tempo real e dados históricos do sistema. O controle de retenção é calculado para o primeiro ponto a jusante de todos os ônibus do sistema. Considera-se um conjunto ou horizonte de pontos de impacto, seguintes ao ponto de controle, para cada um dos ônibus. O modelo utiliza variáveis do tipo inteira para o instante de partida dos ônibus dos pontos, o que leva a uma perda de precisão e ou maior dificuldade para solução do problema de otimização. A função custo utilizada também não considera o atraso dos passageiros embarcados, o que garante a convexidade. A presença de restrições não lineares dificulta a solução do problema (programação inteira não linear), que é resolvido através de um método de busca iterativo (*simulated annealing*). Estas dificuldades, em função do cenário utilizado, podem inviabilizar uma solução em tempo real. O exemplo apresentado pelos autores não traduz esta possibilidade, limitando-se a solução de um problema bastante simples e restrito.

De forma geral, os trabalhos de controle do espaçamento entre ônibus via estratégia de retenção, que fazem uso de programação matemática, apresentam modelos bastante similares aos acima descritos. O principal fator diferenciador entre os trabalhos é a heurística utilizada ou procedimento de solução para o problema de otimização. O problema de otimização, em função do modelo utilizado, função custo não convexa e ou restrições não lineares (na forma mais completa ou realista), pode implicar numa solução

não compatível, em termos de tempo de processamento, para uma aplicação em tempo real. Além disso, devido a não convexidade da função custo, não há garantias de um ótimo global, o que pode comprometer os resultados. A maioria dos trabalhos tentam contornar estas dificuldades simplificando a função custo e as restrições associadas ao modelo do sistema de transporte público, o que, acaba levando a uma distorção destes modelos quando comparados com o sistema real. Outros ainda, se aplicam somente para cenários de dimensão limitada.

2.4 Estratégias de Controle Semafórico com Prioridade para Ônibus

Os congestionamentos e sinalizações usualmente presentes no tráfego causam desvios e perturbações sobre o serviço do sistema de transporte público. Ainda, ações visando ajustes ao plano de horários ou espaçamento entre ônibus são bastante prejudicadas devido à dificuldade em acelerar os ônibus em situações de congestionamento ou mesmo em vias compartilhadas com outros veículos. Estas perturbações causam atrasos significativos e aumento nos custos operacionais dos sistemas de transporte público. Nestes casos, a solução mais apropriada é a utilização de uma estratégia de prioridade para os ônibus nas interseções sinalizadas.

A prioridade para ônibus é uma estratégia operacional que facilita o movimento dos ônibus através do controle semafórico das interseções, reduzindo os atrasos e o tempo de viagem destes. Podem-se citar ainda como benefícios: melhora no cumprimento do plano de horários e ou espaçamento, redução do número de paradas dos ônibus (diminuindo desgaste e quebra do equipamento), aumento do conforto para o motorista e passageiros, redução da emissão de poluentes, etc. Entretanto, se não bem projetada, a prioridade pode causar impactos excessivamente negativos no restante do tráfego como um aumento no atraso dos veículos, pedestres e até um aumento dos tempos de viagem dos ônibus (Heydecker, 1983).

2.4.1 Características das Estratégias de Prioridade para Ônibus

As estratégias de prioridade para o transporte público caem dentro de duas grandes categorias (Skabardonis, 1998a),

- baseadas na infra-estrutura: por exemplo faixas segregadas para ônibus;
- baseadas no controle da temporização semafórica.

Um exemplo de prioridade baseada na infra-estrutura, através da utilização de faixas segregadas para os ônibus, são os sistemas BRT. A estratégia de prioridade para ônibus baseada no controle da sinalização ou temporização semafórica aparece classificada de várias formas na literatura, conforme citado abaixo,

- segundo sua estrutura: prioridade local ou prioridade de rede (Head, 1998);
- segundo o tipo de lógica: passiva, ativa e adaptativa tempo real (Sunkari *et al.*, 1995; Yagar, 1993; Kim, 2004);
- outros (Diakaki *et al.*, 2002).

No caso da prioridade local, implementada numa interseção isolada, não existe a preocupação com o impacto da sinalização no restante da rede e com a progressão dos veículos através desta. Num cenário de rede ou numa arterial estas preocupações estão presentes, tornando a tarefa de controle com prioridade sujeita a restrições de coordenação semafórica. A Figura 2.2 abaixo mostra a classificação das estratégias de prioridade para ônibus segundo o tipo de lógica utilizada.

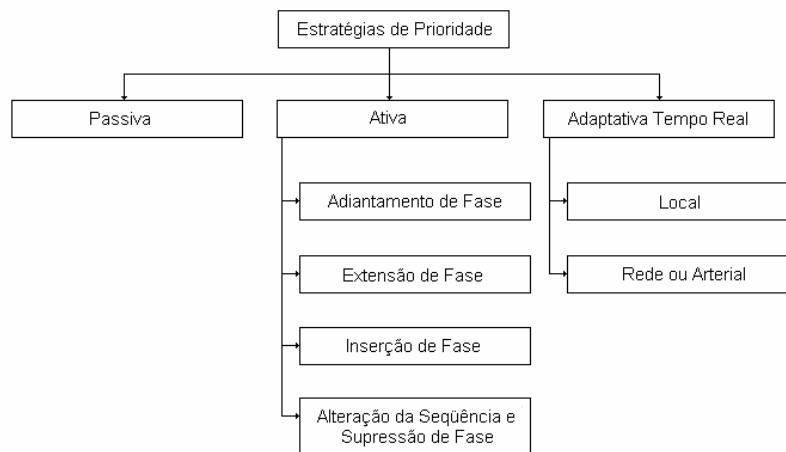


Figura 2.2. Classificação das estratégias de prioridade para ônibus

Os vários tipos de lógica de prioridade apresentados na Figura 2.2 são descritos a seguir.

- **Prioridade Passiva:** opera continuamente com ou sem a presença dos ônibus, sem necessidade de detecção. Utilizada geralmente para o caso de uma operação de transporte público previsível e estável, associada a um baixo volume de tráfego e serviço de ônibus com alta frequência. A especificação da temporização semafórica ou das fases nas interseções utiliza dados relativos ao tempo de viagem, plano de horários e ou espaçamento entre os ônibus. O objetivo é servir com mais frequência a fase com mais alta demanda de ônibus. Como a sinalização é especificada para favorecer a movimentação dos ônibus, outros veículos podem sofrer atrasos e paradas desnecessários. Apresenta baixo custo de implantação e eficiência limitada. As principais estratégias utilizadas são: ajuste do tempo de ciclo, divisão de fase e planos de temporização de área (Shalaby e Lee, 2006).
- **Prioridade Ativa:** somente implementada quando da detecção do ônibus, geralmente próxima à interseção. A sinalização, baseada num sistema de regras, é alterada para favorecer o deslocamento do ônibus detectado. É mais eficiente e mais utilizada do que a prioridade passiva. Requer infra-estrutura adicional como dispositivos para detecção dos ônibus, comunicação com o controlador da interseção e sistema de controle da sinalização mais complexo. As principais estratégias utilizadas são: antecipação de fase, extensão de fase, fase atuada para ônibus (inserção de fase), rotação de fase (alteração da sequência das fases), e supressão de fase. Pode ser implementada em interseções locais ou em vias arteriais e redes de tráfego. Apesar de mais eficiente que a prioridade passiva, pode levar a uma perda de coordenação do sistema de tráfego, fato este que deve ser evitado ou minimizado.
- **Prioridade Adaptativa Tempo Real:** sistemas de sinalização de tráfego tradicionais possuem estratégias de prioridade limitadas (Head, 1998; Mirchandani *et al.*, 2000), eficazes somente para interseções com baixo volume de tráfego, podendo causar problemas aos outros veículos e pedestres, à coordenação com outras interseções e à operação dos ônibus (principalmente para ônibus adiantados em relação ao plano de horários ou com espaçamento abaixo do especificado). Numa estratégia de prioridade adaptativa tempo real a sinalização é baseada na otimização de um critério de desempenho que pode incluir a minimização do atraso de pessoas (passageiros, motoristas, pedestres), ônibus, veículos em geral, minimização de paradas, consumo de combustível, emissão de poluentes, combinações destes e

outros (Desaulniers e Hickman, 2003). O nível de prioridade para os ônibus é especificado em função do número de passageiros embarcados, desvios em relação ao plano de horários, espaçamento nominal, etc. Leva em conta a observação de dados em tempo real, dados históricos e a disposição de um modelo do sistema de tráfego e do sistema de transporte público. Tipicamente requer a detecção antecipada dos ônibus permitindo maior tempo para implementação da estratégia de prioridade e minimização do impacto no restante do tráfego. Muitas vezes também requer informações relativas ao tempo de chegada dos ônibus às interseções, que pode variar em função do número de paradas, número de passageiros que embarcam e desembarcam nos pontos e condições do tráfego. Principais estratégias: controle a nível de interseção (local) e controle a nível de rede.

As estratégias de prioridade para ônibus se fundem em relação ao tipo e abrangência, podendo, por exemplo, existir estratégias de prioridade passiva, ativa e adaptativa tempo real com abrangência local ou de rede. Geralmente, o método mais apropriado de estratégia de prioridade é a combinação de vários elementos das técnicas de prioridade existentes (Chada e Newland, 2002).

Uma política de prioridade para o transporte público deve satisfazer os objetivos gerais das várias agências envolvidas no controle do tráfego, devendo-se considerar os ônibus ou usuários do serviço de transporte público, veículos de passeio e utilitários, pedestres, etc.

As principais características presentes nas estratégias de prioridade ativa e adaptativa tempo real estão descritas a seguir (Head, 1998).

1. Níveis de prioridade: os níveis de prioridade para os ônibus são contínuos, do mais baixo até o mais alto.
 - Baixo nível (prioridade nula): o ônibus é tratado como qualquer outro veículo. O ônibus e veículos são detectados e o controlador, dentro da estratégia de temporização semafórica, não favorece de forma particular a movimentação do ônibus. Não requer infra-estrutura de comunicação entre o ônibus e o sistema de controle.
 - Alto nível (prioridade condicional e incondicional): detecção e comunicação específica para os ônibus. Na estratégia de prioridade condicional, o nível

de prioridade é baseado no status do ônibus, como, por exemplo, aderência ao plano de horários, desvio em relação ao espaçamento nominal e número de passageiros embarcados. Dependendo do nível de prioridade concedido, pode permitir somente verde mínimo para as outras fases, entre o tempo de recebimento da requisição de prioridade para o ônibus e sua implementação via sinalização. Pode incluir ainda salto de fases, alteração na seqüência de fases, etc. No nível mais alto, prioridade incondicional ou absoluta, a fase corrente é imediatamente interrompida e a prioridade atendida (preempção).

2. Estratégia reativa (direta) ou pró-ativa (indireta).

- Reativa: detecção e tomada de decisão locais. É a mais comum e permite uma solução particular para o ônibus quando este se aproxima da interseção. É aplicável a áreas com baixos níveis de congestionamento.
- Pró-Ativa: tomada de decisão em rede ou global, com a detecção dos ônibus geralmente várias interseções a montante. Necessita infra-estrutura adicional. Implementa a prioridade com um mínimo de impacto sobre os demais veículos. Leva em conta a aleatoriedade do tempo de viagem do ônibus até a interseção devido à característica estocástica do tempo de embarque e desembarque de passageiros nos pontos e condições do tráfego. Tenta facilitar o deslocamento do ônibus diminuindo paradas e atrasos (Flamm, 2001). Principalmente aplicável a áreas com altos níveis de congestionamento.

3. Método de restabelecimento da sinalização após a concessão da prioridade.

- Recuperação: depois de atendida a prioridade, geralmente reativa, o processo de recuperação se inicia com a determinação de quanto tempo deve ser adicionado ou subtraído de cada fase para sincronizar novamente a sinalização com o restante do sistema ou rede de tráfego.
- Transição: geralmente para prioridade pró-ativa, envolve o ajuste da temporização de múltiplos sinais, garantindo a progressão dos veículos.

4. Estratégias de prioridade diferenciadas para cada cenário: as particularidades de cada cenário como posicionamento dos pontos e estações em relação à detecção dos ônibus e interseções, demanda de pedestres, espaçamentos entre interseções, estacionamentos, infra-estrutura disponível, etc., implicam em restrições e ou oportunidades para implantação de estratégias de prioridade diferenciadas.

Estratégias eficientes de prioridade para ônibus tendem e devem incluir as quatro características citadas anteriormente, que estão fortemente relacionadas entre si.

2.4.2 Estrutura de um Sistema de Prioridade para Ônibus

As estratégias de prioridade apresentam uma estrutura básica conforme indicado na Figura 2.3 abaixo (Head, 1998). Os eventos e intervalos de decisão indicados e descritos abaixo são válidos para lógicas de prioridade local e de rede.

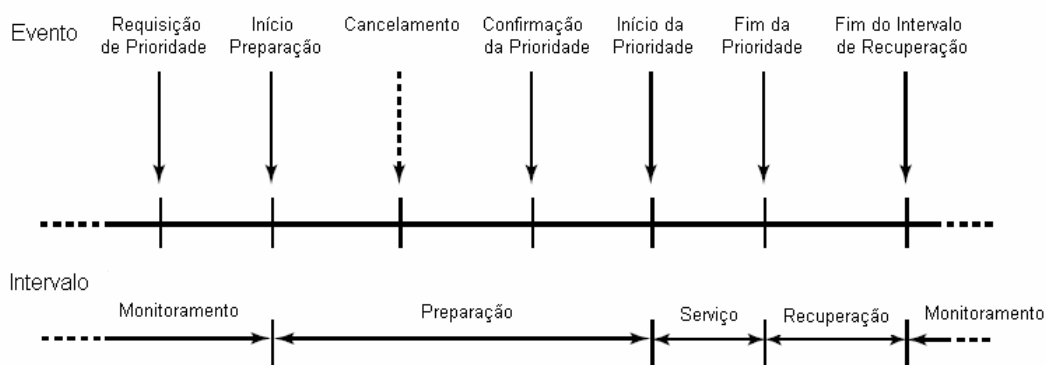


Figura 2.3. Eventos e intervalos típicos de uma estratégia de prioridade para ônibus
(extraído de Head, 1998)

- **Intervalo de Monitoramento:** período de coleta de informações relativas ao sistema de sinalização e da rede de tráfego. Inclui o pedido de requisição de prioridade.
- **Intervalo de Preparação:** a lógica ou estratégia de prioridade inicia o processo de decisão. Do início do intervalo de preparação até o instante de compromisso de serviço, a requisição de prioridade pode ser cancelada sem afetar a temporização da sinalização. Alcançado o período de confirmação de serviço a prioridade é confirmada.
- **Intervalo de Serviço:** período de tempo no qual a temporização semafórica é modificada para implementar a lógica de prioridade.
- **Intervalo de Recuperação:** período no qual o impacto da implementação da lógica de prioridade sobre o tráfego em geral é minimizado, retornando-se a situação de não prioridade na sinalização. O retorno à condição de operação normal geralmente

leva alguns ciclos (3 a 4), o que minimiza o impacto sobre o restante do tráfego (Flamm, 2001).

Os eventos e intervalos associados citados servem como base para uma discussão e propostas de novas estratégias de prioridade.

2.5 Estrutura Física para o Controle de Retenção e Prioridade

A implementação de estratégias de prioridade e retenção exigem, de forma geral, um nível mínimo de sofisticação tecnológica. Dependendo da lógica utilizada e eficiência desejada, este nível de sofisticação pode ser maior ou menor. No caso das estratégias de prioridade ativa e adaptativa, é fundamental a detecção seletiva dos ônibus. Já no caso de uma estratégia de retenção, é fundamental a informação do instante de partida dos ônibus dos pontos. Nos dois casos é desejável a informação do número de passageiros embarcados nos ônibus. A possibilidade de comunicação entre o ônibus ou dispositivos embarcados e o sistema de controle, mesmo que pequena, expande bastante a capacidade de implementação destas estratégias.

Existe uma série de tecnologias utilizadas para a detecção dos ônibus como detectores indutivos do tipo *loop*, emissores ópticos, detectores tipo radar, vídeo, “GPS/AVL”, rádio frequência e outros. No caso de vias utilizadas exclusivamente por ônibus (corredores exclusivos) qualquer uma das tecnologias citadas pode ser utilizada. No caso de vias compartilhadas com outros tipos de veículos, a detecção dos ônibus deve ser seletiva, limitando a tecnologia em detectores tipo rádio frequência, emissores ópticos, IR e “GPS/AVL”. Cada sistema de detecção possui suas vantagens e desvantagens, sendo que nenhum consegue cobrir satisfatoriamente todas as aplicações.

No caso de uma estratégia de prioridade, o tipo de sistema de detecção e comunicação utilizado influencia na antecedência com que a requisição de prioridade é recebida pelo sistema de controle e, portanto, nas possibilidades (tempo) para processamento das informações.

Os custos relacionados com as estratégias de prioridade e retenção devem considerar a estrutura física, equipamentos, software e recursos humanos envolvidos na implantação, operação e manutenção do sistema (Baker *et al.*, 2002).

2.5.1 Sistemas de Transporte Inteligentes (STI)

Dentro do conceito Sistemas de Transporte Inteligentes (STI ou “ITS”), as tecnologias do tipo bilhetagem eletrônica, internet, sistemas de informação geográfica, GPS, comunicação *wireless*, hardware e software de controle, algoritmos de otimização, modelos de simulação e outras, têm proporcionado novas e mais eficientes estratégias de controle tempo real para sistemas de transporte público. Estas tecnologias permitem uma melhora nos serviços e como consequência um aumento na demanda por transporte público (Head, 1998; Mirchandani *et al.*, 2001).

Para uma visão unificada dos vários “atores” num ambiente típico STI utiliza-se muito a representação na forma de uma arquitetura de sistema. Esta arquitetura STI é constituída de um conjunto de subsistemas interligados entre si e tem por objetivo demonstrar de forma clara e simples, as propriedades, funções, operação e comunicação destes e entre estes subsistemas.

Como exemplo de arquitetura para sistemas de transporte público pode-se citar a “NIA” (*National ITS Architecture*), do Departamento de Transportes Americano (<http://www.iteris.com/itsarch/index.htm>), utilizada aqui como referência.

No contexto STI aplicados à operação de sistemas de transporte público destaca-se, aqui neste trabalho, a arquitetura relacionada com as estratégias de prioridade e retenção. Esta arquitetura, baseada na arquitetura “NIA”, está representada de forma resumida na Figura 2.4. Aparecem indicados os principais subsistemas (gerenciador de tráfego, gerenciador de transporte público, veículos de transporte público ou ônibus, rede viária e suporte ao usuário do transporte público) e os principais fluxos de informação compartilhados entre estes subsistemas. As principais funções associadas a estes subsistemas estão descritas abaixo.

- Subsistema Gerenciador de Tráfego (SGT): monitora e controla o tráfego em geral (veículos de passeio, utilitários, ônibus, veículos especiais, pedestres e outros) e se comunica com SGTs de outras jurisdições para coordenar informações do tráfego e estratégias de controle.
- Subsistema Gerenciador de Transporte Público (SGTP): responsável pelo gerenciamento, operação, manutenção, planejamento e informações relativas ao transporte público e a coordenação com outros modos de transporte e serviços. Recebe e envia informações e dados da operação corrente (tempo real) do sistema de transporte público para o SGT e outros subsistemas.

- Subsistema Veículos de Transporte Público (SVTP): constituído por equipamentos embarcados nos ônibus, é responsável pelas funções de sensoriamento, processamento, armazenamento de dados e comunicação utilizados no suporte para o controle da movimentação dos ônibus, informação aos passageiros, etc. As informações são fornecidas principalmente para o SGTP, como por exemplo: informação do número de passageiros embarcados, bilhetagem eletrônica, requisição de prioridade, localização do ônibus (LAV ou “AVL”), sensoriamento do ônibus para manutenção, informações acerca do plano de horários, itinerário, pontos, estações, etc.
- O Subsistema Rede Viária (SRV): inclui os equipamentos distribuídos ao longo da rede viária responsáveis pelo monitoramento e controle do tráfego e monitoramento e gerenciamento da rede viária. Estas informações são fornecidas principalmente para o SGT, através de detectores de veículos nas vias, sensores ambientais, controladores semafóricos, câmeras, sistemas de vídeo e processamento de imagem, sistemas de rádio e comunicação, etc.
- O Subsistema Suporte ao Usuário do Transporte Público (SSUTP): é constituído por equipamentos instalados nos pontos e estações de embarque e desembarque de passageiros, quiosques e outros locais de interesse, responsáveis pelo monitoramento dos passageiros, como contagem do número de passageiros, e sistema de informação aos passageiros, como aderência dos ônibus ao plano de horários, rotas, serviços de emergência, etc. As informações relativas ao número de passageiros nos pontos são repassadas principalmente para ao SGTP.

As operações típicas relacionadas com as estratégias de prioridade e retenção, baseadas na arquitetura apresentada na Figura 2.4, são descritas nas seções seguintes. Importante salientar que dentro das estratégias de prioridade e retenção, os subsistemas devem ser analisados de forma conjunta e não como subsistemas independentes.

2.5.2 Arquitetura Típica de um Sistema de Controle de Prioridade

Conforme já descrito, as estratégias de prioridade baseadas no controle da sinalização são classificadas de acordo com sua abrangência (local ou rede) e de acordo com o tipo de lógica (passiva, ativa e adaptativa). No contexto STI destacam-se as lógicas ativa e adaptativa, com abrangência local ou de rede.

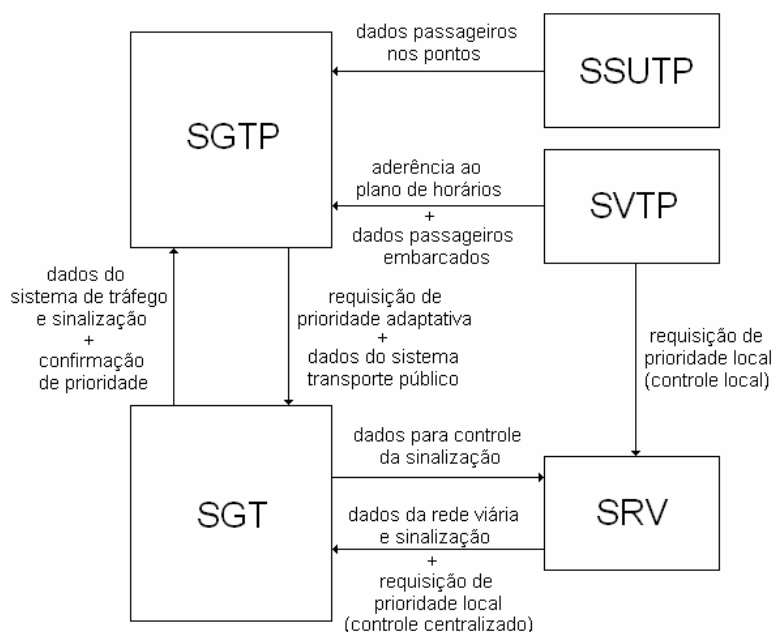


Figura 2.4. Representação simplificada da arquitetura física e dos fluxos de informação típicos de um sistema de controle de prioridade e retenção

No caso mais simples, prioridade local com controle local, são necessários somente dois subsistemas: SVTP e SRV. Quando o ônibus se aproxima da interseção o SVTP se comunica diretamente com o SRV para requisição da prioridade e repassa as informações relativas ao plano de horários e ou espaçamentos (optativo). A requisição de prioridade, caso aceita, é processada pelo controlador local da interseção, baseada na estratégia estabelecida (geralmente lógica ativa), e os dados de temporização semafórica implementados. As informações relativas à requisição e implementação da prioridade são informadas ao SGT, caso presente. Não há garantias de que desvios no plano de horários e espaçamentos sejam corrigidos. Esta arquitetura é recomendada para áreas onde o tráfego de veículos é uniforme, sendo descartada a possibilidade de coordenação com outras interseções.

No caso de prioridade local e controle centralizado, são necessários três subsistemas: SVTP, SRV e SGT. A implementação desta arquitetura é mais complexa que a anterior, já que há necessidade do SGT. O SRV, uma vez recebida a requisição de prioridade, encaminha a requisição diretamente ao SGT, que obtém informações acerca do plano de horários e espaçamentos do SGTP. Este processa a lógica de prioridade, caso aprovada, baseado na estratégia estabelecida (lógica ativa ou adaptativa), e encaminha os dados de temporização semafórica para o controlador local da sinalização da interseção.

Uma coordenação entre as interseções é possível, sendo necessário que o SGT processe algumas informações adicionais.

Nos dois casos de prioridade local citados, o sistema só recebe a informação de requisição de prioridade quando o ônibus se encontra próximo à interseção. Assim, o tempo para o processamento das informações e execução da estratégia de prioridade é limitado, o que pode comprometer a eficiência da estratégia de prioridade e afetar de forma negativa o tráfego em geral.

No caso de prioridade de rede e controle centralizado, mais avançado, são utilizados quatro subsistemas: SVTP, SGTP, SGT e SRV. O SGTP recebe informações do SVTP acerca da localização e aderência ao plano de horários e ou espaçamentos dos ônibus (dentro da região ou zona de interesse) durante todo o período de deslocamento destes dentro da rede. O SGTP processa as informações e as envia ao SGT que, juntamente com os dados referentes ao tráfego em geral, processa estas informações e decide, baseado na estratégia estabelecida (lógica adaptativa), quando, como e onde atuar para implementação da prioridade. Por sua vez, o SGT envia os dados ao SRV para implementação da sinalização pelos controladores das interseções. Em seguida confirma a concessão de prioridade para o SGTP. A lógica de prioridade adaptativa, como o nome indica, se adapta ao comportamento da rede de tráfego, o que permite uma coordenação entre as interseções e menor impacto no restante do tráfego. Caso a área de abrangência do sistema seja muito grande, a fragmentação dos SGT e SGTP pode ser uma solução.

Importante salientar que a escolha da estratégia de prioridade a ser utilizada depende das características de abrangência e complexidade da rede de tráfego, da eficiência desejada, da infra-estrutura disponível, etc. Cada uma das estratégias de prioridade tem suas peculiaridades em termos de eficiência, complexidade e custo de implantação e manutenção.

2.5.3 Arquitetura Típica de um Sistema de Controle de Retenção

Conforme já descrito, existem vários tipos de estratégias de retenção, que podem ser classificadas de acordo com a lógica utilizada (binária, proporcional, “PREFOL” e programação matemática). No contexto STI destacam-se as estratégias de retenção baseadas em lógica de programação matemática, que utiliza como variável de decisão o tempo de retenção dos ônibus nos pontos e, como função custo a ser minimizada, o tempo

de atraso dos passageiros, nos pontos e ou embarcados. Estes modelos fazem uso de dados tempo real obtidos via STI e dados históricos do sistema de transporte público.

Numa estratégia de retenção que utiliza uma lógica de programação matemática, seja para controle do plano de horários ou do espaçamento entre ônibus, tipicamente o SGTP recebe informações do SVTP acerca da aderência ao plano de horários e ou espaçamentos e do número de passageiros embarcados, do SGT a respeito das condições do tráfego e da sinalização, e do SSUTP a respeito do número de passageiros nos pontos e estações. O SGTP também pode receber informações de vários sistemas para processamento e confecção de dados históricos como o tempo de viagem dos ônibus entre pontos, fração de passageiros embarcados que desembarcam em cada ponto, taxa de chegada de passageiros aos pontos, tempo de embarque e desembarque por passageiro, etc. De posse destas informações o SGTP processa estas informações e decide, baseado na estratégia estabelecida, quanto, para quais ônibus e em quais pontos efetuar a retenção. A estratégia de retenção baseada numa lógica de programação matemática permite uma solução que leva em conta vários indicadores como o atraso de passageiros nos pontos e o atraso dos passageiros embarcados, além de outros indicadores de interesse, o que permite maior eficiência na solução e minimização do impacto sobre o restante do tráfego.

CAPÍTULO 3

CONTROLE INTEGRADO DA SEMAFORIZAÇÃO E DA PARTIDA DO ÔNIBUS DO PONTO EM INTERSEÇÃO ISOLADA

3.1 Introdução

Vários trabalhos abordam o tema controle adaptativo da sinalização de uma interseção isolada, alguns incluindo a possibilidade de prioridade para os ônibus, podendo-se citar os trabalhos de Lin *et al.* (1995), Skabardonis (1998a), Mirchandani *et al.* (2001), Gazis (2002), Dion e Hellinga (2002), Liu *et al.* (2003) e outros. Dentro deste tema, apresenta-se neste capítulo o modelo de um sistema que integra o controle adaptativo da temporização semafórica e o controle da partida dos ônibus do ponto próximo à interseção. O sistema de controle, aqui denominado CISPOP (Controle Integrado da Semaforização e Partida do Ônibus do Ponto), baseado nos trabalhos de Koehler e Kraus (2006a, 2006b, 2009), aplica-se a interseções isoladas, e permite a implantação, via controle da sinalização, da prioridade para os ônibus.

As estratégias para controle da operação de sistemas de transporte público, dada a disponibilidade das tecnologias e facilidades STI (ou “ITS”), permitem a implantação de lógicas de controle do tipo adaptativa, mais complexas e eficientes. Entretanto, esta maior complexidade está associada a um maior tempo para o processamento da lógica de controle, o que implica na necessidade de maior antecedência na detecção dos ônibus e requisição de prioridade. A detecção e requisição de prioridade antecipadas, por sua vez, exigem uma predição da trajetória do ônibus, baseada numa estimativa do tempo de embarque e desembarque de passageiros nos pontos e do tempo de viagem até a interseção. Estas estimativas geralmente são baseadas em dados históricos e ou modelos estocásticos e podem apresentar erros significativos (Head, 1998). Uma detecção do ônibus e requisição de prioridade após o processo de embarque e desembarque de passageiros, no ponto próximo à interseção, elimina o erro associado a esta predição. Já a localização do ponto próximo à interseção, minimiza o erro associado à predição do tempo de viagem do ônibus, podendo, entretanto, inviabilizar a estratégia de controle devido à limitação de tempo para

o processamento (Kim, 2004). Neste contexto, a lógica aqui utilizada no CISPOP se propõe simples, além de eficiente, para permitir o processamento num curto intervalo de tempo. Podem-se citar ainda como características da estratégia aqui proposta a utilização de uma lógica adaptativa e um modelo analítico.

As políticas de operação tempo real para sistemas de transporte público, como por exemplo, a estratégia de prioridade para os ônibus via controle da temporização semafórica e a estratégia de controle do espaçamento entre os ônibus via retenção nos pontos, devem satisfazer os objetivos gerais das várias agências envolvidas no controle do tráfego. Isto implica num critério de desempenho como, por exemplo, um custo operacional mínimo na interseção, função do atraso de pessoas, veículos, paradas de veículos, emissão de poluentes, consumo de combustível, etc. (Desaulniers e Hickman, 2003).

A prioridade facilita o movimento dos ônibus através das interseções sinalizadas, o que implica numa diminuição do tempo de viagem dos ônibus e do atraso dos passageiros embarcados. Assim, a prioridade permite um tratamento diferenciado para os usuários do sistema de transporte público (Heydecker, 1983). Por sua vez, estratégias de controle de retenção tem por objetivo manter os ônibus dentro do plano de horários e ou espaçamento especificados. Este controle evita o efeito de agrupamento ou *bunching* entre os ônibus, o que minimiza o tempo de espera dos passageiros nos pontos.

Entretanto, uma operação ou controle independente entre as estratégias de prioridade e retenção, pode, por exemplo, concedida a prioridade, adiantar um ônibus já adiantado em relação ao plano de horários. Isto implica num impacto negativo e desnecessário sobre os usuários do sistema de transporte público e sobre o restante do tráfego. Assim, surge a proposta de um sistema de controle adaptativo, para o caso de uma interseção isolada, que integre a estratégia de prioridade e o controle da partida do ônibus do ponto próximo à interseção. Outros benefícios associados a esta integração são descritos nas seções seguintes.

O controle do instante de partida do ônibus do ponto, conforme aqui proposto, além de permitir um controle de retenção, permite otimizar a trajetória do ônibus até a interseção. Esta otimização se dá através da escolha simultânea ou integrada do instante de partida do ônibus do ponto e da temporização semafórica, com possibilidade de prioridade para o ônibus. Dadas as características do modelo da interseção isolada aqui utilizado, com a conseqüente típica limitação de informações relativas ao restante da rede de tráfego e

outras interseções adjacentes, a aplicação do CISPOP é direcionada para uma operação do sistema de transporte público baseada no plano de horários, operação esta bastante comum.

O principal fator inovador do CISPOP está relacionado com o gerenciamento da partida do ônibus do ponto próximo à interseção. Este gerenciamento é baseado em dois modos de operação: partida imediata PI e partida controlada PC do ônibus do ponto. Na operação PI, tradicional, após encerrado o processo de embarque e desembarque de passageiros, o ônibus parte do ponto imediatamente e, caso exista fila de veículos na via devido à sinalização, fica retido na fila até sua dissipação. Na operação PC, o ônibus fica retido no ponto até que sua trajetória até a interseção evite uma parada devido à possível fila de veículos. A escolha entre a operação PI ou PC é baseada no menor custo de operação do sistema de tráfego na interseção, função do atraso dos passageiros embarcados nos ônibus, atraso dos usuários dos veículos de passeio e do custo de parada do ônibus na fila de veículos. O nível de prioridade para o ônibus é especificado em função da aderência ou desvio do ônibus em relação ao plano de horários, do número de passageiros embarcados e do custo associado ao atraso destes passageiros. Cada operação, PI e PC, implica em valores diferenciados para o instante de partida do ônibus do ponto e para os valores da temporização semafórica da interseção. A possibilidade de reter o ônibus no ponto, operação PC, pode, a princípio, sugerir um atraso desnecessário. Entretanto, este atraso na partida do ponto pode implicar num menor custo para o ônibus e passageiros embarcados, devido à eliminação de paradas até a interseção.

Nas seções seguintes são apresentados o modelo da interseção isolada, o sistema de gerenciamento da partida do ônibus do ponto e controle da sinalização e, o modelo matemático do CISPOP. Um comparativo entre as operações PI e PC é apresentado e analisado.

3.2 Modelo da Interseção Isolada

O modelo aqui estudado, conforme indicado na Figura 3.1, é composto de uma interseção isolada controlada por semáforo, com duas vias de mão única, com a via 1 sujeita à presença do ônibus. Considera-se que a interseção opera sob condições de não saturação, ou seja, os tempos de verde e ciclo são suficientes para evitar fila excedente (ou atraso aleatório). Considera-se também que o fluxo máximo é de um ônibus a cada dois ciclos, o que é bastante razoável, principalmente para uma operação baseada no plano de

horários. Caso da presença de outro ônibus dentro deste intervalo, este é tratado como um veículo comum, sem controle da partida do ponto.

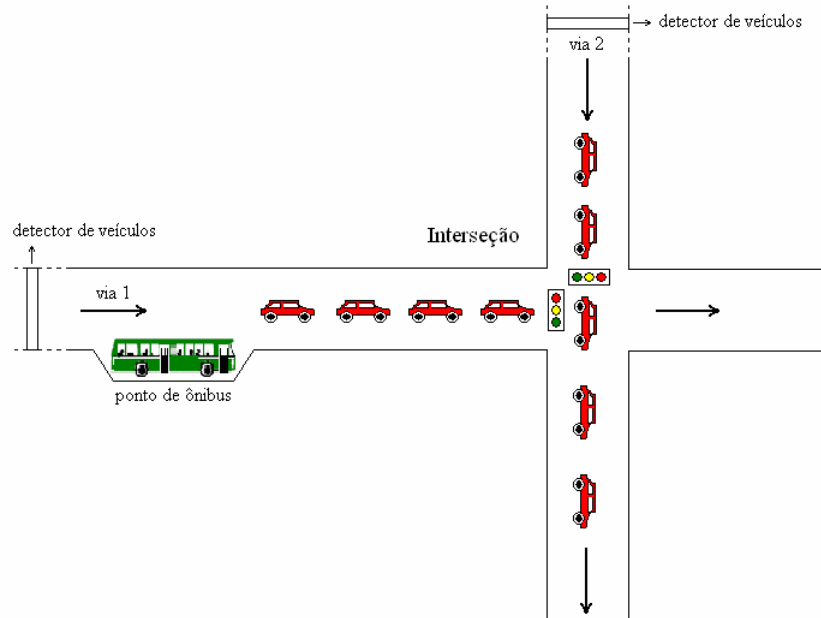


Figura 3.1. Representação da interseção isolada com duas vias de mão única e o ponto de ônibus

Para o sistema de controle adaptativo da sinalização da interseção aqui proposto, pressupõe-se a medição em tempo real das seguintes informações: estado da sinalização, fluxo médio de veículos de passeio por ciclo, instante de requisição de partida do ônibus do ponto, aderência do ônibus ao plano de horários e número de passageiros embarcados nos ônibus. Como a requisição de partida do ponto é efetuada após o processo de embarque e desembarque de passageiros a estimativa deste tempo para predição da trajetória do ônibus até a interseção não é necessária e, portanto, o erro associado a esta predição é eliminado. A representação da fila de veículos na interseção considera um modelo de fluxo contínuo de veículos e fila vertical ou pontual (Lin, 2007). A trajetória do ônibus até a interseção é função do instante de partida do ponto e da fila de veículos na via 1 da interseção.

A Figura 3.2 apresenta o esquema do sistema de gerenciamento da partida do ônibus do ponto próximo à interseção. De forma resumida, o sistema de controle funciona como: o motorista do ônibus ou um dispositivo automático embarcado, após encerrado o processo de embarque e desembarque de passageiros no ponto, informa ao sistema de controle da interseção a condição do ônibus liberado para partir, denominado aqui instante

de requisição da partida do ônibus do ponto ou t_r . Os valores ótimos do instante de partida do ônibus do ponto ou t_p e da temporização semafórica, são calculados baseados no menor custo de operação do sistema de tráfego na interseção.

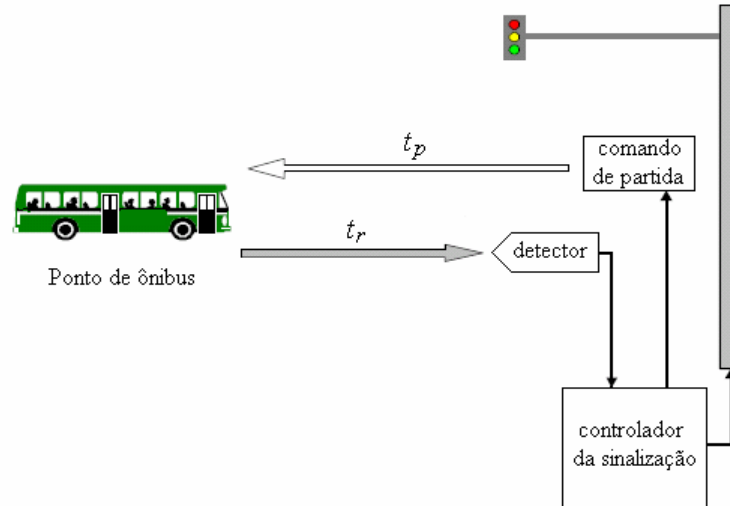


Figura 3.2. Sistema de gerenciamento da partida do ônibus do ponto próximo à interseção

Em vários trabalhos anteriores, como em Lin *et al.* (1995), assume-se um modelo de chegada de veículos representado por uma taxa constante, dada pelo valor médio do fluxo de veículos medido durante um período de tempo (passado, presente e predição futura) representativo, conforme indicado na Figura 3.3.

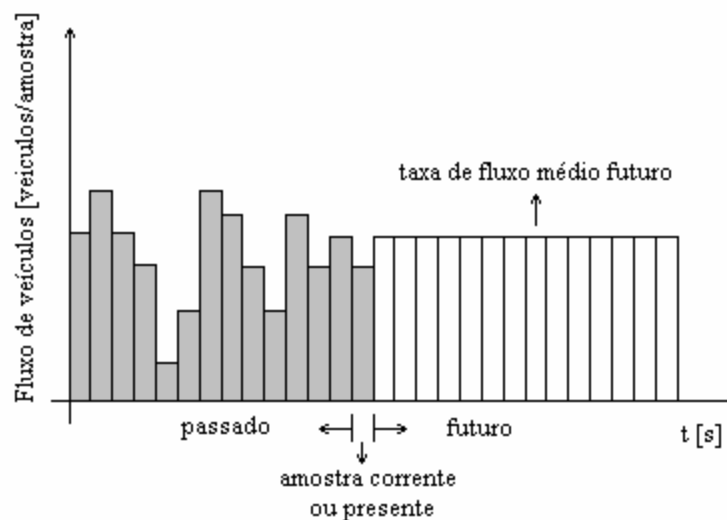


Figura 3.3. Perfil típico do fluxo de veículos medido (passado e presente) e estimado (futuro) [extraído de Lin *et al.* (1995)]

Outros trabalhos consideram a taxa do fluxo de veículos conhecida e baseada em dados históricos (Gerlough e Huber, 1975). A representação do modelo de chegada de veículos por uma taxa constante permite uma abordagem analítica, o que simplifica o problema, embora não tão precisa quanto uma abordagem numérica. Por simplificação, este trabalho considera um modelo baseado numa taxa constante de chegada de veículos à interseção.

3.3 Modelo Matemático do Sistema de Tráfego da Interseção Isolada

A Figura 3.4 apresenta o processo de formação da fila de veículos numa via de uma interseção sinalizada, considerando-se um modelo de chegada de veículos representado por uma taxa constante. O estado da sinalização, vermelho ou verde, aparece indicado na parte inferior do gráfico. A distância vertical dentro das áreas pintadas representa o número de veículos acumulados desde o início do vermelho e o eixo horizontal o tempo. A reta qt indica a taxa constante de chegada de veículos e a reta st o fluxo de saturação da via ou interseção. A região pintada sob a reta qt representa o atraso acumulado dos veículos durante um ciclo. Conforme observado, o atraso dos veículos se propaga além do término do vermelho devido ao tempo gasto para dissipação da fila acumulada. Observa-se também que os tempos de verde e ciclo são suficientes para dissipação da fila acumulada dentro do ciclo, ou seja, uma operação sob condições de não saturação.

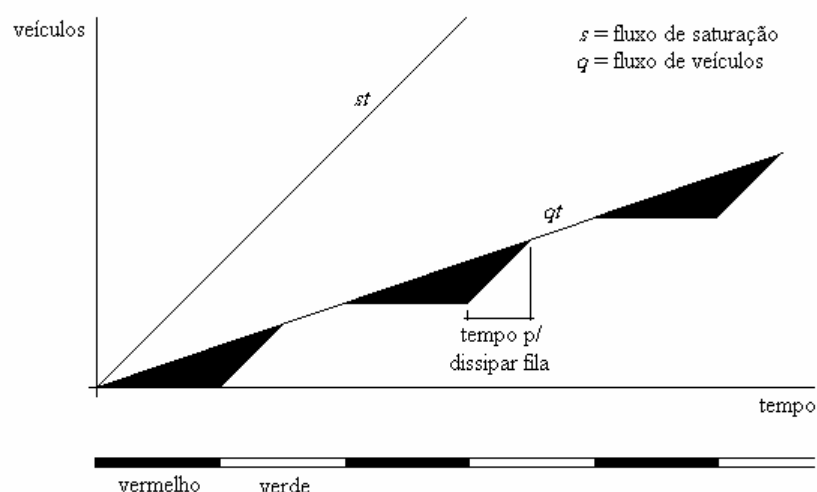


Figura 3.4. Modelo de formação e dissipação da fila de veículos numa via sinalizada
[extraído de Gerlough e Huber, 1975)]

Para este cenário, o atraso total de veículos por ciclo, na via considerada, é dado por (Gerlough e Huber, 1975):

$$D = \frac{qr^2}{2\left(1 - \frac{q}{s}\right)} \quad (3.1)$$

onde D : atraso total de veículos na via por ciclo [s];
 r : tempo de vermelho na via [s];
 q : taxa constante do fluxo de veículos na via [veículos/s];
 s : fluxo de saturação da via [veículos/s].

O custo total da interseção CTI , conforme modelo da Figura 3.1, para dado ciclo, é dado pelo custo do atraso dos ocupantes dos veículos de passeio nas vias 1 e 2, pelo custo do atraso dos passageiros embarcados no ônibus e pelo custo de parada do ônibus devido à fila de veículos na via 1 da interseção. A expressão resultante é dada por:

$$CTI = D_{car1} l_{car} c_d + D_{car2} l_{car} c_d + D_{bus} l_{bus} c_{bd} g + c_{bs} \quad (3.2)$$

onde CTI : custo total da interseção por ciclo [\$];
 D_{car1} : atraso total de veículos na via 1 por ciclo [s];
 D_{car2} : atraso total de veículos na via 2 por ciclo [s];
 D_{bus} : atraso do ônibus por ciclo [s];
 l_{car} : número de passageiros por veículo;
 c_d : custo do atraso do passageiro de veículo por segundo [\$/s];
 l_{bus} : número de passageiros embarcados no ônibus;
 c_{bd} : custo do atraso do passageiro embarcado no ônibus por segundo [\$/s];
 c_{bs} : custo da parada do ônibus devido à fila de veículos na interseção [\$];
 g : fator de ganho do ônibus associado à política de prioridade adotada.

Na Equação (3.2), o atraso do ônibus D_{bus} aparece multiplicado pelo fator de ganho g que é função da política de prioridade adotada, como por exemplo, o desvio do ônibus em relação ao plano de horários no instante de requisição de partida do ônibus do ponto ou t_r . Tipicamente, para o ônibus atrasado em relação ao plano de horários, g é maior que 1 e

para o ônibus adiantado em relação ao plano de horários g é menor que 1. Ou seja, quanto mais atrasado o ônibus em relação ao plano de horários, maior a parcela do custo associado ao ônibus em relação ao CTI . O nível de prioridade do ônibus é definido como G , função do número de passageiros embarcados, fator de ganho e do custo do atraso do passageiro embarcado no ônibus:

$$G = l_{bus} c_{bd} g \quad (3.3)$$

Por questão de simplicidade a Equação (3.2) não considera o custo associado à parada dos veículos de passeio. O custo de parada do ônibus devido à fila de veículos na interseção é representado por c_{bs} . Este custo de parada do ônibus pode refletir fatores objetivos e subjetivos como o desgaste do ônibus, consumo adicional de combustível, poluição do ar, ruído, desconforto para o motorista e passageiros embarcados, impacto negativo sobre o restante do tráfego, etc.

Sem a presença do ônibus ($g=0$ e $c_{bs}=0$), a temporização semafórica para um CTI mínimo, pode ser obtida substituindo (1) em (2), derivando em relação à r_1 e igualando a zero. Logo,

$$r_{1nom} = \frac{x_2 C}{x_1 + x_2} \quad (3.4)$$

com

$$x_1 = \frac{q_1 l_{car} c_d}{2 \left(1 - \frac{q_1}{s} \right)} \quad (3.5)$$

$$x_2 = \frac{q_2 l_{car} c_d}{2 \left(1 - \frac{q_2}{s} \right)} \quad (3.6)$$

- onde r_{1nom} : tempo de vermelho ou vermelho nominal da via 1 (sem ônibus) para um CTI mínimo [s];
 C : tempo de ciclo [s];
 q_1 : taxa constante do fluxo de veículos na via 1 [veículos/s];
 q_2 : taxa constante do fluxo de veículos na via 2 [veículos/s].

O valor ótimo para a temporização semafórica da via 2 é dado por:

$$r_{2nom} = C - r_{1nom} = \frac{x_1 C}{x_1 + x_2} \quad (3.7)$$

onde r_{2nom} : tempo de vermelho ou vermelho nominal da via 2 (sem ônibus) para um *CTI* mínimo [s].

3.4 Gerenciamento da Partida do Ônibus do Ponto

Com a presença do ônibus e requisição de partida do ponto no instante t_r , implementa-se a estratégia CISPOP aqui proposta. Esta estratégia pode ser dividida em três modos de gerenciamento, definidos pelos intervalos I, II e III indicados na Figura 3.5. O modo de gerenciamento a ser utilizado, I, II ou III, é selecionado em função do instante de requisição da partida do ônibus do ponto t_r em relação ao início do ciclo. Ou seja, seleciona-se o intervalo ou modo de gerenciamento que contém t_r . O gráfico da Figura 3.5 apresenta no eixo horizontal (tempo) a temporização semafórica e o tempo de ciclo e no eixo vertical a distância em relação à linha de retenção da interseção, com indicação da distância d_{ponto} do ponto de parada do ônibus a montante da interseção. Aparece indicado também o processo de formação e dissipação da fila de veículos nas vias 1 e 2 (distância do último veículo parado na fila até a interseção) devido à sinalização r_{1nom} (tempo de vermelho nominal da via 1), com o eixo vertical representando a posição (distância) do último veículo parado na fila. Os modos ou intervalos I, II e III, selecionados em função de t_r , são delimitados pelos tempos t_{p_nom} , t_{p_max} e t_{p_ext} :

- $0 < t_r < t_{p_nom}$ ou $t_{p_ext} < t_r \leq C$, (modo I);
- $t_{p_nom} \leq t_r \leq t_{p_max}$ (modo II);
- $t_{p_max} < t_r \leq t_{p_ext}$ (modo III).

Na Figura 3.5, t_{p_nom} é o valor mínimo do tempo de partida do ônibus do ponto para que este não fique retido na fila de veículos da via 1 em sua trajetória até a interseção; t_{p_max} é o valor máximo do tempo de partida para o ônibus vencer a interseção no ciclo corrente; e t_{p_ext} é o valor máximo do tempo de partida para o ônibus vencer a interseção considerando a extensão máxima do tempo de verde. Estes tempos são definidos por:

$$t_{p_nom} = \frac{r_{1nom} v_1 (v + q_1 l_v)}{v(v_1 - q_1 l_v)} - \frac{d_{ponto}}{v} \quad (3.8)$$

Os três modos de gerenciamento da estratégia aqui proposta são descritos e analisados a seguir.

3.4.1 Caso para $t_{p_nom} \leq t_r \leq t_{p_max}$ (modo II)

Este é o caso mais simples, onde a temporização semafórica já está definida por r_{1nom} de acordo com a Equação (3.4). O ônibus não fica retido na fila de veículos em sua trajetória até a interseção (não há necessidade de prioridade) e, não é necessária a extensão do verde na via 1. A partida do ônibus do ponto é imediata, dada por:

$$t_{p_II} = t_r \quad (3.11)$$

onde t_r : instante de requisição de partida do ônibus do ponto (em relação ao início do ciclo) [s];
 t_{p_II} : instante de partida do ônibus do ponto para o modo II [s].

Como t_r acontece após o término de r_{1nom} e o ônibus consegue vencer a interseção no ciclo corrente, a temporização semafórica nominal conforme Equação (3.4) é mantida para os dois ciclos seguidos, dada por:

$$r_{1_II}^{1ciclo} = r_{1nom} \quad (3.12)$$

$$r_{1_II}^{2ciclo} = r_{1nom} \quad (3.13)$$

onde $r_{1_II}^{1ciclo}$: tempo de vermelho da via 1 para o primeiro ciclo no modo II [s];
 $r_{1_II}^{2ciclo}$: tempo de vermelho da via 1 para o segundo ciclo no modo II [s].

3.4.2 Caso para $t_{p_max} < t_r \leq t_{p_ext}$ (modo III)

Neste caso, o ônibus também não fica retido na fila de veículos em sua trajetória até a interseção, mas, é necessária uma extensão do verde na via 1 para que o ônibus consiga vencer a interseção no ciclo corrente. Esta extensão do verde caracteriza uma política de prioridade para o transporte público. A partida do ônibus do ponto também é imediata, dada por:

$$t_{p_III} = t_r \quad (3.14)$$

onde t_{p_III} : instante de partida do ônibus do ponto para o modo III [s].

Como t_r também acontece após o término de r_{1nom} , mantém-se r_{1nom} conforme Equação (3.4) no primeiro ciclo e estende-se o verde da via 1 no primeiro ciclo para permitir que o ônibus vença a interseção. Logo:

$$r_{1_III}^{1ciclo} = r_{1nom} \quad (3.15)$$

onde $r_{1_III}^{1ciclo}$: tempo de vermelho da via 1 para o primeiro ciclo no modo III [s].

Com a extensão do verde na via 1, r_{1nom} no segundo ciclo é reduzido proporcionalmente. Para evitar um resíduo de fila de veículos na via 2 no segundo ciclo, fila esta dissipada durante o tempo de verde da via 2 no segundo ciclo, o tempo máximo de verde estendido para a via 1 no primeiro ciclo, é dado por:

$$g_{1ext_max}^{1ciclo} = \frac{v(v_1 - q_2 l_v)C}{v_1(v + q_2 l_v)} \quad (3.16)$$

onde $g_{1ext_max}^{1ciclo}$: tempo máximo do verde estendido da via 1 para o primeiro ciclo no modo III.

O tempo necessário de verde estendido na via 1 no primeiro ciclo, para permitir a passagem do ônibus pela interseção, para dado t_r , é dado por:

$$g_{1ext_III}^{1ciclo} = t_r + \frac{d_{ponto}}{v} - r_{1nom} \quad (3.17)$$

onde $g_{1ext_III}^{1ciclo}$: tempo de verde estendido da via 1 para o primeiro ciclo no modo III [s].

Em função da extensão do verde da via 1 no primeiro ciclo, o vermelho da via 1 no segundo ciclo é reduzido proporcionalmente, dado por:

$$r_{1_III}^{2ciclo} = C - g_{1ext_III}^{1ciclo} \quad (3.18)$$

onde $r_{1_III}^{2ciclo}$: tempo de vermelho da via 1 para o segundo ciclo no modo III [s].

3.4.3 Caso para $0 < t_r < t_{p_nom}$ ou $t_{p_ext} < t_r \leq C$ (modo I)

Conforme anteriormente descrito, neste modo I (I_a e I_b) a partida do ônibus do ponto, uma vez requisitada a partida através de t_r , pode ser imediata (PI) ou sofrer uma retenção adicional (PC). O instante de partida do ônibus do ponto t_p , é calculado para um mínimo custo de operação da interseção CTI , o que implica na escolha entre uma operação PI e PC e da respectiva temporização semaforica. As operações PI e PC serão apresentadas e analisadas nas próximas seções.

3.5 Modo I: Operação Partida Imediada PI e Partida Controlada PC

A Figura 3.6 apresenta as trajetórias típicas do ônibus para as operações PI e PC do modo I (caso I_a com $t_r < t_{p_nom}$), bem como o atraso do ônibus D_{bus_PI} e D_{bus_PC} para cada operação. O eixo horizontal representa o tempo, com indicação dos instantes de requisição da partida do ônibus do ponto t_r , instante de partida do ônibus do ponto t_{p_PI} para operação PI e instante de partida do ônibus do ponto t_{p_PC} para operação PC. O eixo vertical representa a distância em relação à linha de retenção da interseção, localizada na origem.

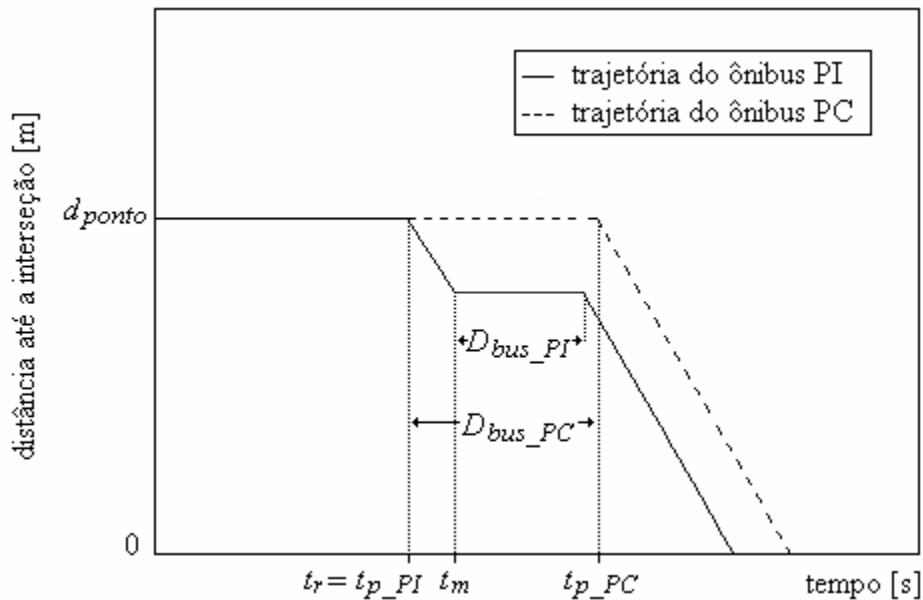


Figura 3.6. Trajetória típica do ônibus nas operações PI e PC

Conforme indicado na Figura 3.6, em ambas as operações PI e PC, a informação relativa à condição do ônibus liberado para partir do ponto ou instante de requisição t_r , ocorre com o ônibus parado no ponto, localizado a uma distância d_{ponto} da interseção.

A trajetória do ônibus na operação PI é caracterizada pelo instante de partida do ponto t_{p_PI} igual ao instante de requisição de partida t_r . A partir de t_r o ônibus se move com velocidade nominal em direção à interseção até parar, no instante t_m , devido à fila de veículos a sua frente. O ônibus permanece parado na fila durante o tempo D_{bus_PI} até a fila a sua frente se dissipar, movendo-se então com velocidade nominal até cruzar a interseção.

Na operação PC, o ônibus fica retido no ponto durante o tempo D_{bus_PC} , até que sua trajetória até a interseção fique livre, sem necessidade de parada devido à fila de veículos. O instante de partida do ônibus do ponto na operação PC é representado por t_{p_PC} e dado pelo instante de requisição de partida t_r mais o tempo de retenção D_{bus_PC} do ônibus no ponto.

Pode-se verificar na Figura 3.6, através das trajetórias PI e PC, que no instante do cruzamento do ônibus pela interseção (distância zero), a operação PC apresenta um atraso do ônibus em relação à operação PI. Esta diferença ou atraso do ônibus na operação PC em relação à operação PI é típica e será discutida novamente mais adiante.

A seguir serão apresentadas mais detalhadamente as operações PI e PC e analisado seu impacto sobre o sistema de tráfego na interseção. Primeiramente, dentro do modo I, será analisado o caso I_a onde $t_r < r_{1nom}$, ou seja, a temporização r_{1nom} ainda pode ser alterada. O caso I_b para $r_{1nom} \leq t_r < t_{p_nom}$, com a temporização r_{1nom} já definida, será analisado na sequência.

3.5.1 Operação Partida Imediata PI (modo I_a)

Na Figura 3.7 aparecem indicadas a trajetória típica do ônibus e a posição final do último veículo da fila nas vias 1 e 2 da interseção para uma operação PI. Aparecem indicadas também a temporização semafórica r_{1_PI} ou vermelho (valor ótimo) da via 1 para a operação PI e a distância do ponto de parada até a interseção d_{ponto} .

Conforme já descrito, a partida do ônibus do ponto na operação PI é imediata, dada por,

$$t_{p_PI} = t_r \quad (3.19)$$

onde t_{p_PI} : instante de partida do ônibus do ponto na operação PI [s].

No instante t_r o ônibus está parado no ponto a uma distância d_{ponto} da interseção. O ônibus parte imediatamente do ponto no instante t_{p_PI} com velocidade nominal e encontra o final da fila de veículos formada na via 1 no instante de tempo t_m , dado por:

$$t_m = \frac{d_{ponto} + vt_r}{q_1 l_v + v} \quad \text{para } l_1(t_r) < d_{ponto} \quad (3.20)$$

onde t_m : Instante em que o ônibus em sua trajetória até a interseção encontra o final da fila de veículos [s];

l_1 : comprimento da fila de veículos na via 1 [m].

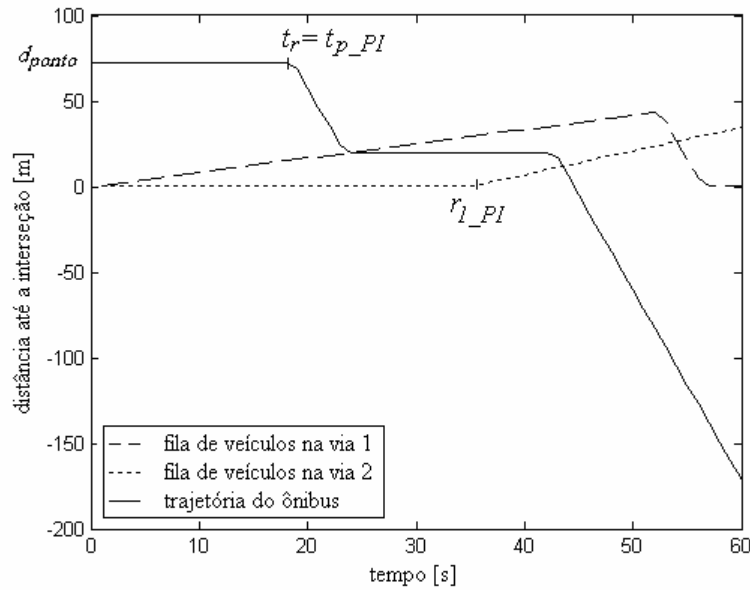


Figura 3.7. Trajetória do ônibus e fila de veículos nas vias 1 e 2 para operação PI

O atraso do ônibus na operação PI é dado pelo tempo que este ficou parado na fila de veículos, dado por:

$$D_{bus_PI} = r_{1_PI} + t_m \left(\frac{q_1 l_v}{v_1} - 1 \right) \quad \text{para } t_r < r_{1_nom} \quad (3.21)$$

onde r_{1_PI} : tempo de vermelho da via 1 para operação PI [s].

Como pode ser verificado na Equação (3.21), o atraso do ônibus na operação PI aumenta linearmente com o valor da temporização semafórica r_{1_PI} . A distância do último veículo parado na fila da via 1 até a interseção, para r_{1_PI} é dada por:

$$l_{1_PI} = \frac{q_1 r_{1_PI} l_v v_1}{v_1 - q_1 l_v} \quad (3.22)$$

onde l_{1_PI} : distância do último veículo parado na fila da via 1 até a interseção para operação PI [m].

Substituindo (21) in (2), a expressão para o CTI na operação PI, com a presença do ônibus, é dada por:

$$CTI_{_PI} = x_1 r_{1_PI}^2 + x_2 r_{2_PI}^2 + D_{bus_PI} G + c_{bs} \quad (3.23)$$

com

$$r_{2_PI} = C - r_{1_PI} \quad (3.24)$$

onde r_{2_PI} : tempo de vermelho da via 2 para operação PI [s].

A temporização semafórica ótima na operação PI, para um mínimo $CTI_{_PI}$, é obtida derivando (23) em relação à r_{1_PI} e igualando a zero:

$$r_{1_PI} = \frac{2x_2 C - G}{2(x_1 + x_2)} \quad (3.25)$$

Conforme verificado na Equação (3.25) a temporização ótima na operação PI não depende do custo c_{bs} de parada do ônibus devido à fila de veículos na interseção. Verifica-se também que o instante de requisição de partida do ônibus do ponto t_r e o fator de ganho g estão representados no nível de prioridade G do ônibus. Comparando as Equações (3.4) e (3.25) verifica-se que a temporização r_{1_PI} será sempre menor que r_{1nom} .

3.5.2 Operação Partida Controlada PC (modo I_a)

Na Figura 3.8 aparecem indicadas a trajetória típica do ônibus e a posição final do último veículo da fila nas vias 1 e 2 da interseção para uma operação PC. Aparecem

indicadas também a temporização semafórica r_{1_PC} ou vermelho (valor ótimo) da via 1 para a operação PC e a distância do ponto de parada até a interseção d_{ponto} .

Conforme já descrito, o instante de partida do ônibus do ponto para a operação PC é calculado para que a trajetória do ônibus até a interseção coincida com o último veículo da fila se movendo. Assim, de acordo com Gazis (2002):

$$t_{p_PC} = \frac{l_{1_PC}}{v_1} - \frac{d_{ponto} - l_{1_PC}}{v} + r_{1_PC} \quad \text{para } d_{ponto} \geq l_{1_PC} \quad (3.26)$$

com

$$l_{1_PC} = \frac{q_1 r_{1_PC} l_v v_1}{v_1 - q_1 l_v} \quad (3.27)$$

- onde t_{p_PC} : instante de partida do ônibus do ponto para operação PC [s];
 r_{1_PC} : tempo de vermelho da via 1 para operação PC [s];
 l_{1_PC} : distância do último veículo parado na fila da via 1 até a interseção para operação PC [m].

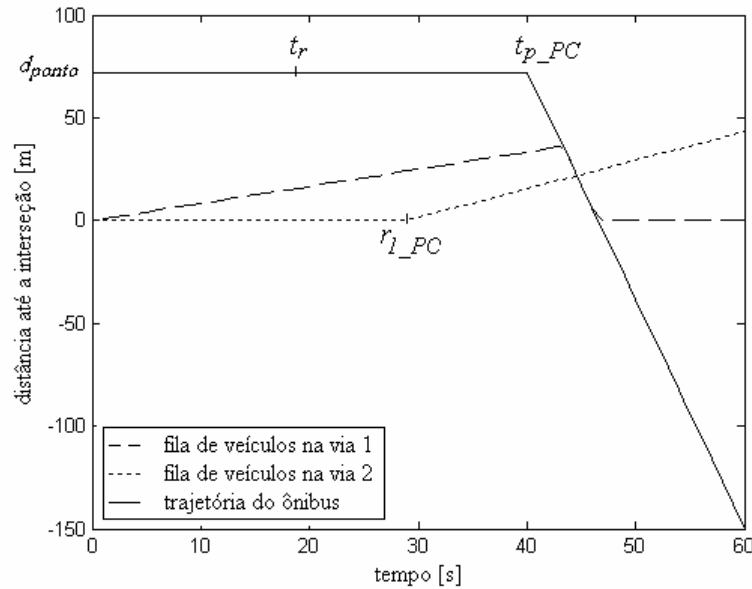


Figura 3.8. Trajetória do ônibus e fila de veículos nas vias 1 e 2 para operação PC

A retenção do ônibus no ponto D_{bus_PC} é dada pela diferença entre o instante de partida do ônibus do ponto t_{p_PC} e o instante de requisição de partida t_r . Dado que o modelo

PC considera que o ônibus não para em sua trajetória até a interseção, o atraso do ônibus é o próprio tempo de retenção, dado por:

$$D_{bus_PC} = t_{p_PC} - t_r \quad (3.28)$$

Substituindo (26) e (27) em (28) tem-se:

$$D_{bus_PC} = (x_A + 1)r_{1_PC} - \frac{d_{ponto}}{v} - t_r \quad para \quad t_r < r_{1nom} \quad (3.29)$$

com x_A constante definido por

$$x_A = \frac{q_1 l_v (v + v_1)}{v(v_1 - q_1 l_v)} \quad (3.30)$$

De forma similar à operação PI, a Equação (3.29) indica que o atraso do ônibus na operação PC aumenta linearmente com o valor da temporização semafórica r_{1_PC} .

Substituindo (29) in (2), a expressão para o CTI na operação PC, com a presença do ônibus, é dada por:

$$CTI_{_PC} = x_1 r_{1_PC}^2 + x_2 r_{2_PC}^2 + D_{bus_PC} G \quad (3.31)$$

com

$$r_{2_PC} = C - r_{1_PC} \quad (3.32)$$

sujeita à

$$r_{1_PC} \geq \frac{\frac{d_{ponto}}{v} + t_r}{x_A + 1} \quad (3.33)$$

A restrição da Equação (3.33) garante uma solução viável para t_{p_PC} ($t_{p_PC} \geq t_r$). A temporização semafórica ótima na operação PC, para um mínimo $CTI_{_PC}$, da mesma forma que na operação PI, é obtida derivando (31) em relação à r_{1_PC} e igualando a zero:

$$r_{1_PC} = \frac{2x_2 C - (x_A + 1)G}{2(x_1 + x_2)} \quad (3.34)$$

A temporização semafórica ótima na operação PC é influenciada pelas características da fila de veículos na via 1, associada à x_A da Equação (3.30) e pelo nível de prioridade G do ônibus. Comparando as Equações (3.25) e (3.34) verifica-se que, devido

ao fato de $(x_A + 1)$ ser sempre maior que um, a temporização r_{1_PC} será sempre menor que r_{1_PI} .

3.5.3 Escolha da Operação: PI ou PC (modo I_a)

A partir do momento de recebimento da requisição de partida t_r do ônibus do ponto, a lógica de controle ou CISPOP calcula para cada uma das operações PI e PC: a temporização semafórica ótima da interseção, o instante de partida do ônibus do ponto e o CTI . A operação selecionada para ser implementada é a que apresenta o menor CTI . Para dado cenário e características do tráfego, o CTI de cada operação depende basicamente do instante de requisição t_r . Existe um valor limite de t_r para o qual o CTI se iguala para as duas operações. Para valores de t_r menores que este valor limite a operação PI apresenta menor custo e para valores maiores a operação PC apresenta menor custo. Para o modo I_a aqui analisado, a seleção pode ser feita através do cálculo da diferença de custo CTI_{dif} entre a operação PI e a operação PC:

$$CTI_{dif} = CTI_{PC} - CTI_{PI} \quad (3.35)$$

Portanto,

$$\text{se } CTI_{dif} > 0 \Rightarrow \text{operação PI} \quad (3.36)$$

$$\text{se não } \Rightarrow \text{operação PC} \quad (3.37)$$

Ou seja, a operação que apresentar o menor CTI , PI ou PC, é a escolhida como a estratégia a ser implementada, o que inclui os valores associados ao instante de partida t_p do ônibus do ponto e à temporização semafórica da interseção.

A Tabela 3.1 apresenta uma comparação do CTI para as operações PI e PC (modo I_a com $t_r < r_{1nom}$), considerando-se três valores para t_r . Os demais valores utilizados são: $C=60$ s, $s=0,5$ veículos/s, $Q_1=500$ veículos/h, $Q_2=700$ veículos/h, $v=11,1$ m/s, $l_v=5$ m, $c_d=1$, $l_{car}=1,5$, $c_{bd}=0,1$, $l_{bus}=30$, $c_{bs}=20$, $d_{ponto}=65$ m. Os valores de q_1 e q_2 são obtidos a partir do volume dos fluxos horários Q_1 e Q_2 . O fator de ganho g associado à política de prioridade adotada e a temporização semafórica associada às operações PI e PC também estão indicados na Tabela 3.1. Considera-se no exemplo que o valor de t_r igual a 21,2 corresponde a um desvio zero do ônibus em relação ao plano de horários, portanto g igual a 1. Valores de t_r menores implicam num adiantamento do ônibus em relação ao plano de horários, portanto g menor que 1, e valores de t_r maiores implicam num atraso do ônibus em relação ao plano de horários, portanto g maior que 1. Caso não considerado o custo de

parada do ônibus na fila ($c_{bs}=0$), a operação PI sempre apresentará um CTI menor do que a operação PC. Caso considerado este custo de parada, o CTI da operação PI aumenta (soma-se o valor de c_{bs}).

Tabela 3.1. Comparativo do custo total da Interseção nas operações PI e PC para um custo de parada do ônibus $c_{bs}=0$ e $c_{bs}=20$

t_r [s]	g	$c_{bs} = 0$		$c_{bs} = 20$		r_{1_PI} [s]	r_{1_PC} [s]
		CTI_{PI}	CTI_{PC}	CTI_{PI}	CTI_{PC}		
3	0,5	369,2	389,7	389,2	389,7	35,4	34,5
21,2	1,0	374,8	394,8	394,8	394,8	33,5	31,6
33	1,5	359,8	367,7	379,8	367,7	31,5	28,8

Para o exemplo aqui utilizado, um valor de $c_{bs}=20$ iguala o CTI das operações PI e PC para $t_r=21,2$ s. Abaixo deste valor de t_r a operação PI apresenta menor CTI e acima deste valor a operação PC apresenta menor CTI . Conforme verificado, a temporização semafórica r_{1_PI} associada à operação PI é sempre maior do que a temporização semafórica r_{1_PC} associada à operação PC e menor do que a temporização nominal r_{1nom} igual a 37,4 s (calculada via Equação (3.4)).

A Figura 3.9 apresenta uma simulação, baseada nos dados utilizados na Tabela 3.1, das operações PI e PC. Aparecem indicadas a trajetória do ônibus, a posição final da fila de veículos na via 1 das duas operações e as temporizações r_{1_PI} e r_{1_PC} . Utiliza-se um valor de $t_r=21,2$ s, ou seja, o caso onde o CTI é igual nas duas operações. O tempo D_{bus_dif} que aparece indicado representa o atraso de tempo do ônibus da operação PC em relação à operação PI quando do cruzamento pela interseção.

A posição final da fila de veículos na via 1 das operações PI e PC coincidem até determinado ponto ou instante de tempo. Este ponto representa, na operação PC, o encontro do ônibus com o último veículo da fila se movendo ou instante final de dissipação da fila de veículos na via 1. Na operação PI, devido ao maior tempo r_{1_PI} em relação à r_{1_PC} , a fila de veículos na via 1 leva mais tempo para se dissipar. Numa operação PI o tempo ótimo de vermelho da via 1 r_{1_PI} é sempre maior do que r_{1_PC} de uma operação PC e menor e mais próximo do valor nominal r_{1nom} . Isto implica que a operação PI apresenta um impacto menos negativo do que a operação PC sobre o restante do tráfego da interseção. Esta diferença tende a diminuir para valores de t_r próximos a r_{1nom} . Entretanto, os custos

adicionais da operação PC relativos à D_{bus_dif} e ao maior impacto negativo sobre o restante do tráfego na interseção podem, dependendo do caso, ser compensados pela ausência de custo associado à parada do ônibus na fila de veículos, tornando a operação PC a melhor escolha.

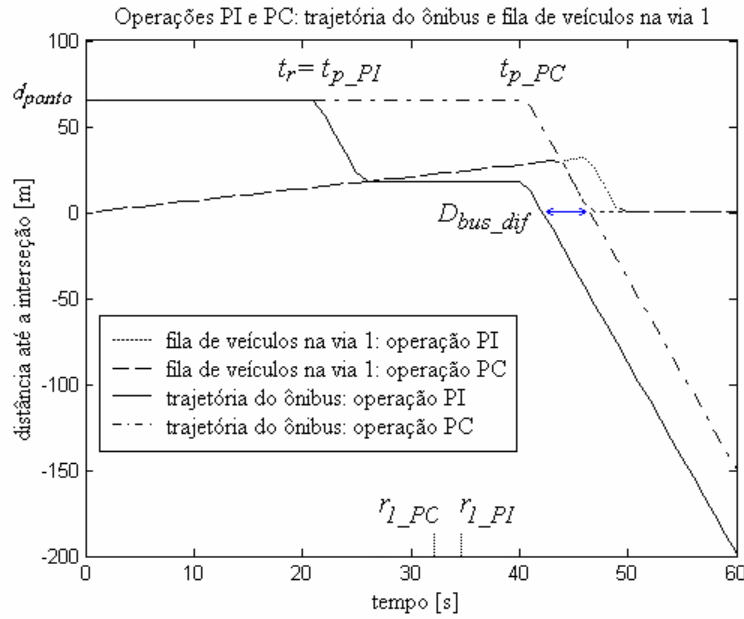


Figura 3.9. Comparativo da trajetória do ônibus e da fila de veículos na via 1 para as operações PI e PC

3.5.4 Restrições para a Temporização Semaforica (modo I_a)

Conforme citado, o modelo aqui apresentado considera uma operação sob condições de não saturação, ou seja, os tempos de verde e ciclo são suficientes para evitar fila excedente (ou atraso aleatório) dos veículos na interseção. Assim, torna-se importante quantificar e limitar a ação de controle para manter a operação sob as condições estabelecidas. Considerando que para dois ciclos seguidos no máximo um ônibus se aproxima da interseção ou solicita uma requisição de partida do ponto t_r , cabe determinar o valor do vermelho mínimo da via 1, no primeiro ciclo (com a presença do ônibus), para que não haja fila residual de veículos na via 2 no segundo ciclo. Esta fila é dissipada durante o tempo de verde da via 2 no segundo ciclo (r_{1nom} no segundo ciclo). Assim, o tempo mínimo de vermelho da via 1, no primeiro ciclo, é dado por:

$$r_{1min} = C - \frac{r_{1nom} v (v_1 - q_2 l_v)}{q_2 l_v (v_1 + v)} \quad (3.38)$$

onde r_{1min} : tempo de vermelho mínimo da via 1 no primeiro ciclo, para evitar resíduo de fila na via 2 no segundo ciclo (com r_{1nom} no segundo ciclo).

A Tabela 3.2 mostra os valores de r_{1nom} e r_{1min} para alguns valores de fluxo de veículos nas vias 1 e 2 da interseção. Conforme esperado, quanto maior o fluxo de veículos menor a redução permitida para r_{1nom} ou maior o valor de r_{1min} . Na prática, estratégias de prioridade baseadas em lógicas passivas ou temporização fixa utilizam valores de tempo de ciclo maiores do que os valores teóricos indicados, de forma a acomodar possíveis flutuações no volume de tráfego (Fehon, 2004). A expressão utilizada por Webster (1958) para cálculo do atraso de veículos numa interseção isolada indica que o atraso é bastante sensível para tempos de ciclo menores que o valor ótimo e não tão sensível para valores maiores (Gazis, 2002).

Tabela 3.2. Valores da temporização nominal r_{1nom} e vermelho mínimo r_{1min} para o primeiro ciclo, para vários valores de fluxo de veículos: $C=60$ s, $s=0,5$ [veículos/s], $v=11,1$ [m/s],

$l_v=5$ [m], $c_d=1$, $l_{car}=1,5$ (Q_1 e Q_2 representam volumes horários)

Q_1 [veh/h]	Q_2 [veh/h]	r_{1nom} [s]	r_{1min} [s]
500	600	33,9	4,6
500	700	37,4	12,0
500	800	40,5	18,7
600	600	30,0	11,0
600	700	33,6	16,9
600	800	36,9	22,3

Conforme já citado, o CISPOP considera que o fluxo médio de veículos se mantém constante para dois ciclos seguidos, sendo o primeiro o ciclo com a presença do ônibus. Considera-se que no segundo ciclo, sem a presença do ônibus, a temporização nominal r_{1nom} é implementada. O modo III anteriormente descrito é uma exceção. A garantia de uma operação sem resíduo de fila de veículos após o segundo ciclo, no modo I_a, é dada pela restrição da Equação (3.38). Ou seja, a Equação (3.38) impõe um limite inferior para o vermelho ótimo da via 1, tanto na operação PI quanto na operação PC.

3.5.5 Caso para $r_{1nom} \leq t_r < t_{p_nom}$ (modo I_b)

Caso a requisição de partida t_r do ônibus do ponto seja efetuada após o período de vermelho nominal na via 1, ou seja, $t_r \geq r_{1nom}$, o tempo de vermelho da via 1 r_{1nom} não pode mais ser alterado. Neste caso, para um tempo de ciclo fixo tem-se, para o modo I_b:

$$r_{1_PI} = r_{1_PC} = r_{1nom} \quad \text{modo I}_b \quad (3.39)$$

Entretanto, conforme indicado na Figura 3.5 (modo I_b), cabe a decisão em relação a uma operação partida imediata PI ou controlada PC do ônibus do ponto. Para uma operação PI, o instante de partida do ônibus do ponto e o atraso do ônibus na fila de veículos da via 1, são dados por:

$$t_{p_PI} = t_r \quad \text{modo I}_b \quad (3.40)$$

e

$$D_{bus_PI} = t_m \left(\frac{q_1 l_v}{v_1} - 1 \right) \quad \text{para } t_r \geq r_{1nom} \quad \text{modo I}_b \quad (3.41)$$

onde t_m é dado pela Equação (3.20). Para uma operação PC, as expressões para o instante de partida do ônibus do ponto, comprimento máximo da fila de veículos na via 1 e atraso do ônibus, são dadas por:

$$t_{p_PC} = \frac{l_{1_PC}}{v_1} - \frac{d_{ponto} - l_{1_PC}}{v} \quad \text{para } d_{ponto} \geq l_{1_PC} \quad \text{modo I}_b \quad (3.42)$$

$$l_{1_PC} = \frac{q_1 r_{1nom} l_v v_1}{v_1 - q_1 l_v} \quad \text{modo I}_b \quad (3.43)$$

$$D_{bus_PC} = (x_A + 1) r_{1nom} - \frac{d_{ponto}}{v} - t_r \quad \text{para } t_r \geq r_{1nom} \quad \text{modo I}_b \quad (3.44)$$

onde x_A é dado pela Equação (3.30) e r_{1nom} pela Equação (3.4).

Assim como no caso $t_r < r_{1nom}$, a escolha entre a operação PI e PC também depende do instante de requisição t_r . Existe um valor limite de t_r para o qual o CTI se iguala para as duas operações. Para valores de t_r menores que este valor limite a operação PI apresenta menor custo e para valores maiores a operação PC apresenta menor custo. A escolha do tipo de operação, no caso aqui analisado para o modo I_b, pode ser simplificada, dado que a temporização semafórica PI e PC é a mesma. Ou seja, calcula-se somente a diferença de custo entre as operações PI e PC associada ao ônibus. Portanto,

$$\text{se } D_{bus_PC}G - (D_{bus_PI}G + c_{bs}) > 0 \Rightarrow \text{operação PI} \quad (3.45)$$

$$\text{se não} \Rightarrow \text{operação PC} \quad (3.46)$$

Ou seja, a operação que apresentar o menor *CTI* ou custo associado ao ônibus, PI ou PC, é a escolhida como a estratégia a ser implementada, o que implica no respectivo instante de partida t_p do ônibus do ponto.

3.6 Comentários sobre o CISPOP

A estratégia de controle integrado da semaforização e da partida do ônibus do ponto (CISPOP) em interseção isolada, aqui apresentada, permite uma operação mais eficiente, em termos de custos, para o sistema de tráfego da interseção, mais especificamente, para o sistema de transporte público. Além de permitir a prioridade para os ônibus através do controle da temporização semafórica da interseção, o principal diferencial do CISPOP está relacionado com a possibilidade de uma operação partida controlada PC do ônibus do ponto, sem necessidade de parada do ônibus devido à fila de veículos na interseção.

A operação partida controlada PC mostra-se uma opção interessante, em termos de custo, para casos onde a requisição de partida do ônibus do ponto t_r acontece mais próxima do final do vermelho nominal da via 1 (via com a presença do ônibus) e, para um fluxo de veículos baixo na via 1 em relação à via 2.

CAPÍTULO 4

ESTRATÉGIA DE CONTROLE DE RETENÇÃO PARA SISTEMAS BRT

4.1 Introdução

Um problema típico relativo à operação de sistemas BRT é o desvio dos ônibus em relação ao plano de horários e ou espaçamento (*headway*), causado por variações probabilísticas no tempo de embarque e desembarque de passageiros nos pontos (devido a variações no número de passageiros) e ou velocidade do ônibus ao longo da rota (devido a variações no volume de tráfego) (Lin *et al.*, 1995). Este desvio ou instabilidade faz com que os ônibus acabem se agrupando e formando pelotões (efeito *bunching*), o que implica num aumento do tempo de espera e viagem dos usuários do sistema de transporte público, passageiros embarcados e nos pontos, além de custos adicionais aos prestadores do serviço.

Estes possíveis desvios podem e devem ser minimizados através de uma estratégia de controle em tempo real, de forma a otimizar o desempenho do sistema (Turnquist e Blume, 1980). Dentre as várias estratégias utilizadas pode-se destacar a retenção ou *hold*, que consiste em reter o(s) ônibus no(s) ponto(s) por determinado tempo, buscando com isso reduzir a variação no espaçamento entre estes.

Nas seções seguintes são apresentados:

- o modelo do sistema BRT conforme representado na literatura em geral, com algumas alterações;
- uma proposta de modelo ampliado do sistema BRT;
- um método de solução para o problema de controle de retenção, para compatibilidade com aplicações em tempo real;
- a validação do método apresentado via simulação;
- um estudo de caso via simulação, da aplicação do método proposto para o controle de retenção de um sistema BRT, e análise dos resultados.

4.2 Modelo do Sistema BRT

O modelo aqui utilizado considera um sistema de transporte urbano tipo BRT, constituído de uma faixa segregada de mão única para os ônibus, operando numa rota fechada, conforme indicado na Figura 4.1 (Koehler *et al.*, 2007, 2008a).

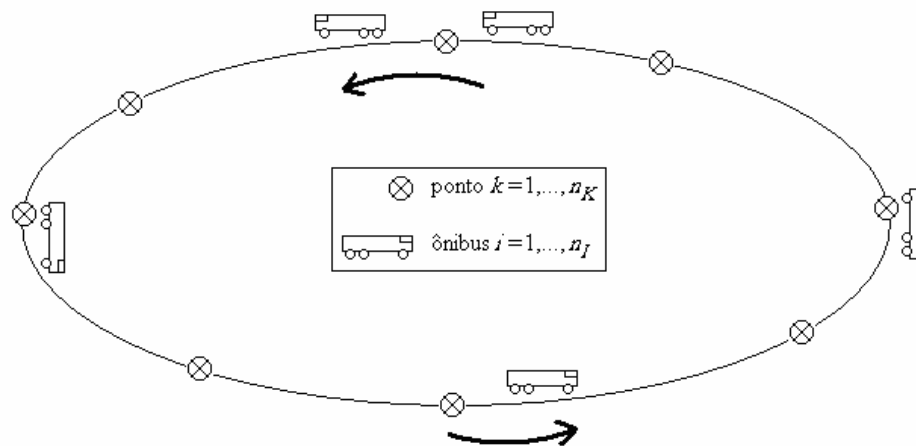


Figura 4.1. Esquema do sistema BRT

Assume-se a disponibilidade das seguintes informações através de sistemas LAV (“AVL”) e CAP (“APC”):

- o instante de partida dos ônibus do último ponto visitado (e anteriores se necessário);
- índice do último ponto visitado pelo ônibus (e anteriores se necessário);
- número de passageiros embarcados no ônibus na saída do último ponto visitado.

Consideram-se os seguintes dados históricos:

- taxa de chegada dos passageiros nos pontos;
- fração de passageiros embarcados nos ônibus que desembarcam em cada ponto;
- parâmetros ou constantes de embarque e desembarque de passageiros nos pontos;
- tempo de viagem dos ônibus entre pontos.

O modelo é sujeito às seguintes aproximações e limitações:

- a capacidade dos ônibus não é considerada (não existe resíduo de fila de passageiros nos pontos);
- o tempo de viagem dos ônibus entre pontos é aproximado pelo valor esperado (incluindo o possível atraso provocado por semáforos);
- o tempo de embarque e desembarque de passageiros é aproximado por uma função linear (Wilson e Lin, 1992), com o embarque e desembarque ocorrendo por portas distintas;
- a função objetivo considera um horizonte limitado de pontos a jusante para cada ônibus na avaliação do impacto da ação de controle;
- a ordem dos ônibus é mantida, sem ultrapassagem entre os ônibus, ou seja, $i-1$ sempre precede i .

Apesar do problema de controle de retenção em tempo real apresentar uma natureza eminentemente estocástica, este pode ser examinado como um caso onde as variáveis estocásticas envolvidas (taxa de chegada de passageiros nos pontos, tempo de viagem dos ônibus entre pontos e percentual de passageiros que desembarcam nos pontos) apresentam, dentro do intervalo de controle ou horizonte de predição, variância muito pequena. Ou seja, o modelo utilizado pressupõe que esta variável mantém seu valor constante dentro do horizonte de predição considerado, com os valores atualizados para o próximo intervalo de controle. Assim, o problema de controle de retenção pode ser aproximado por um modelo determinístico (Eberlein *et al.*, 2001).

O problema de controle de retenção consiste em determinar quanto, em quais pontos e quais ônibus do sistema BRT devem ser retidos para se minimizar a função custo apresentada, ou seja, minimizar o atraso total dos usuários ou passageiros do sistema BRT, para o horizonte de predição considerado. A função custo que representa o atraso total dos passageiros, nos pontos e embarcados é dada por (Koehler *et al.*, 2008a):

$$f = \sum_{i \in I} \sum_{k \in N_i} \left[\frac{\lambda_k}{2} (d_{i,k} - d_{i-1,k})^2 + (1 - q_k) l_{i,k-1} (h_{i,k} + s_{i,k}) \right] \quad (4.1)$$

onde f : função custo do sistema BRT para o horizonte de predição considerado [s];

i : índice dos ônibus, $i=1, \dots, n_I$;

n_I : número de ônibus do sistema BRT;

- I : conjunto de ônibus do sistema BRT, $I=\{1,\dots,n_I\}$;
 k : índice dos pontos, $k=1,\dots,n_K$;
 n_K : número de pontos do sistema BRT;
 K : conjunto de pontos do sistema BRT, $K=\{1,\dots,n_K\}$;
 N_i : conjunto de pontos pertencentes ao horizonte de predição do ônibus i ;
 n_N : número de pontos dentro do horizonte de predição N_i dos ônibus;
 N : seqüência de pontos dentro do horizonte de predição N_i do ônibus i ,
 $N=\{1,\dots,n_N\}$;
 λ_k : taxa de chegada de passageiros ao ponto k [passageiros/s];
 $d_{i,k}$: instante de partida do ônibus i do ponto k [s];
 q_k : fração de passageiros embarcados que desembarcam dos ônibus no ponto k ;
 $l_{i,k}$: número de passageiros embarcados no ônibus i quando da partida do ponto k ;
 $h_{i,k}$: tempo de retenção (ação de controle) do ônibus i no ponto k [s];
 $s_{i,k}$: maior valor dentre os tempos de embarque e desembarque de passageiros do ônibus i no ponto k [s].

No modelo determinístico da Equação (4.1), a função custo considera, para cada um dos ônibus i do sistema BRT, os pontos k dentro do horizonte de predição N_i . A primeira parcela da Equação (4.1) representa o atraso dos passageiros nos pontos e a segunda parcela o atraso dos passageiros embarcados nos ônibus. O atraso ou tempo de espera do passageiro no ponto é definido como o intervalo de tempo entre a chegada do passageiro ao ponto e a partida deste ponto embarcado no ônibus. O atraso ou tempo de espera do passageiro embarcado no ônibus, para determinado ponto, é definido como o intervalo de tempo entre a chegada e a saída do ônibus deste ponto.

As restrições associadas ao modelo (Koehler *et al.*, 2008a) estão indicadas abaixo. Nestas restrições há uma limitação no tratamento das condições iniciais e na representação da volta dos ônibus dentro do circuito fechado BRT. Entende-se que este relaxamento seja útil para um entendimento inicial do modelo proposto para o sistema BRT. Uma extensão deste modelo com a representação explícita das condições iniciais e representação da volta dos ônibus dentro do circuito BRT é apresentada em seguida.

$$a_{i,k} = d_{i,k-1} + r_k \quad i \in I, k \in N_i \quad (4.2)$$

$$s_{i,k}^{emb} = \frac{C_0 + C_1 \lambda_k (a_{i,k} - d_{i-1,k})}{(1 - C_1 \lambda_k)} \quad i \in I, k \in N_i \quad (4.3)$$

$$s_{i,k}^{des} = C_0 + C_2 q_k l_{i,k-1} \quad i \in I, k \in N_i \quad (4.4)$$

$$s_{i,k} = \max(s_{i,k}^{emb}, s_{i,k}^{des}) \quad i \in I, k \in N_i \quad (4.5)$$

$$d_{i,k} = a_{i,k} + s_{i,k} + h_{i,k} \quad i \in I, k \in N_i \quad (4.6)$$

$$d_{i,k} \leq d_{i+1,k-1} + r_k - e_{min} \quad i \in I, k \in N_i \quad (4.7)$$

$$h_{i,k} \leq h_{max} \quad i \in I, k \in N_i \quad (4.8)$$

$$l_{i,k} = \lambda_k (d_{i,k} - d_{i-1,k}) + (1 - q_k) l_{i,k-1} \quad i \in I, k \in N_i \quad (4.9)$$

$$a_{i,k}, d_{i,k}, s_{i,k}, h_{i,k}, l_{i,k} \geq 0 \quad i \in I, k \in N_i \quad (4.10)$$

- onde
- $a_{i,k}$: instante de chegada do ônibus i ao ponto k [s];
 - r_k : tempo de viagem dos ônibus entre os pontos $k-1$ e k [s];
 - $s_{i,k}^{emb}$: tempo de embarque de passageiros no ônibus i no ponto k [s];
 - $s_{i,k}^{des}$: tempo de desembarque de passageiros do ônibus i no ponto k [s];
 - C_0 : tempo para o início do embarque e desembarque de passageiros a partir da chegada do ônibus ao ponto [s];
 - C_1 : tempo gasto para o embarque de cada passageiro nos ônibus [s/passageiro];
 - C_2 : tempo gasto para o desembarque de cada passageiro dos ônibus [s/passageiro];
 - e_{min} : espaçamento temporal mínimo permitido entre os ônibus [s];
 - h_{max} : tempo máximo de retenção dos ônibus nos pontos [s].

As restrições das Equações (4.2) à (4.10) permitem expressar, para o ônibus i e o ponto k , o instante de chegada do ônibus ao ponto, os tempos de embarque (ver Figura 4.2) e desembarque de passageiros no ponto, a operação mais lenta dentre estas, o instante de

partida do ônibus do ponto, o instante máximo de partida do ônibus do ponto para evitar ultrapassagem ou encontro com o ônibus seguinte (dado que esteja no ponto imediatamente a jusante do ônibus seguinte), o limite máximo para retenção do ônibus no ponto, o número de passageiros embarcados no ônibus quando da partida do ponto e a natureza positiva das variáveis. Com exceção da restrição da Equação (4.5), as demais restrições apresentadas são lineares.

Alguns diferenciais presentes no modelo das Equações (4.1) à (4.10) em relação a outros trabalhos são:

- inclusão na função custo da representação do atraso dos passageiros embarcados nos ônibus, Equação (4.1);
- possibilidade do controle de retenção em todos os pontos do horizonte de predição considerado, Equações (4.1) e (4.6);
- utilização de restrição de ultrapassagem entre ônibus e espaçamento mínimo, Equação (4.7);
- utilização de restrição de retenção máxima dos ônibus nos pontos, Equação (4.8);
- representação do número de passageiros embarcados por uma variável contínua, Equação (4.9);

Na Figura 4.2 aparece a representação gráfica do processo de chegada de passageiros ao ponto, embarque de passageiros no ônibus e partida do ônibus do ponto, com indicação dos parâmetros e variáveis envolvidas. No esquema apresentado, assim que o ônibus anterior $i-1$ parte do ponto k ($d_{i-1,k}$), a fila de passageiros no ponto começa a se formar numa taxa λ_k , com o eixo vertical representando o número de passageiros na fila. Com a chegada do ônibus i ao ponto k ($a_{i,k}$), os passageiros, após o tempo C_0 , começam a embarcar no ônibus numa taxa μ_k . Uma vez dissipada a fila de passageiros no ponto, após transcorrido o tempo $s_{i,k}^{emb}$ a partir da chegada do ônibus ao ponto, o ônibus fica liberado para partir ($d_{i,k}$). Se necessário, uma retenção (ação de controle $h_{i,k}$) do ônibus no ponto é aplicada. Pode-se deduzir pela análise da Figura 4.2 que o tempo gasto para extinção da fila de passageiros ou tempo de embarque de passageiros é obtido igualando-se:

$$((a_{i,k} - d_{i-1,k}) + s_{i,k})\lambda_k = (s_{i,k} - C_0)\mu_k$$

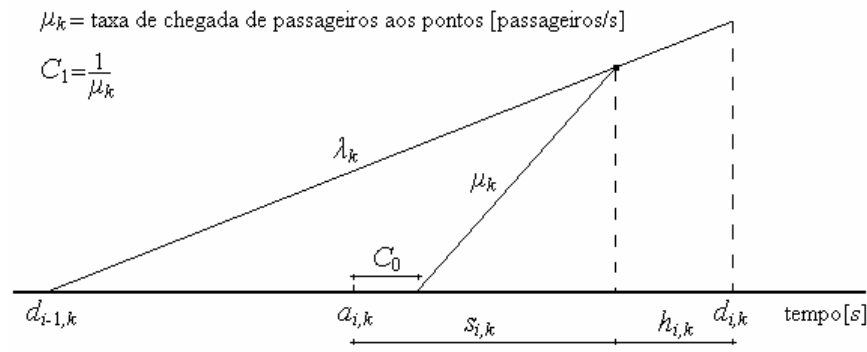


Figura 4.2. Representação do processo de chegada e embarque de passageiros e partida do ônibus do ponto

4.3 Modelo Ampliado para o Sistema BRT

Os principais parâmetros do modelo do sistema BRT que influenciam na ação de controle de retenção $h_{i,k}$, são a máxima retenção permitida $h_{máx}$ e o número de pontos n_N dentro do horizonte de predição N_i de cada ônibus. Esta influência sobre a ação de controle de retenção é analisada a seguir, seguida da proposta de um modelo ampliado para o sistema BRT, que permita representar os fatores associados a estes parâmetros analisados.

Para evitar um desconforto excessivo aos passageiros embarcados, avaliação subjetiva, a retenção $h_{i,k}$ é limitada por $h_{máx}$, o tempo máximo de retenção dos ônibus nos pontos. Esta limitação insere uma restrição adicional para a variável de controle $h_{i,k}$, conforme Equação (4.8), e altera os valores de $h_{i,k}$ (e das outras variáveis) para casos com solução $h_{i,k}$ (sem a restrição da Equação (4.8)) maior que $h_{máx}$. Como pode ser verificado na função custo da Equação (4.1), o modelo proposto permite a retenção ou ação de controle $h_{i,k}$ em qualquer ponto do horizonte de predição N_i . Isto não é possível, por exemplo, nos trabalhos apresentados por Eberlein *et al.* (2001) e Zolfaghari *et al.* (2004), que só permitem a ação de controle de retenção num único ponto dentre os pontos do circuito fechado BRT ou no primeiro ponto ($N_i^{N=1}$) dentro do horizonte de predição N_i de cada ônibus respectivamente. Assim, no modelo aqui utilizado, uma possível limitação da ação de controle $h_{i,k}$, através de $h_{máx}$, pode ser compensada nos outros pontos do horizonte de predição. Apesar dos pontos do horizonte de predição, com exceção do primeiro ponto de cada ônibus ou $N_i^{N=1}$, serem uma projeção futura da ação de controle, a possibilidade de diluição da ação de controle em todo o horizonte N_i permite uma solução mais eficiente.

Uma análise da primeira parcela da Equação (4.1) indica que, para o horizonte de

predição considerado, um custo mínimo é obtido agrupando-se os ônibus. Ou seja, valores de $d_{i,k}$ e valores de $d_{i-1,k}$ o mais próximo possível. Como consequência, há um aumento no espaçamento ou *headway* em relação aos ônibus não considerados no horizonte de predição e portanto, um aumento do custo associado a estes ônibus. Apesar deste custo não aparecer na função custo, devido à limitação do horizonte de predição, entende-se que para um horizonte de predição reduzido, há uma distorção na representação do modelo do sistema BRT e conseqüente aumento do custo real de operação do sistema. No exemplo apresentado em Zolfaghari *et al.* (2004), por exemplo, existe uma limitação no horizonte de predição (de 5 pontos) em relação ao número de pontos ($n_K=26$), o que facilita solução do problema de otimização (programação não linear inteira), em detrimento da qualidade da solução. Para o modelo e procedimento aqui propostos, conforme apresentado a seguir, esta limitação não está presente.

A utilização de um horizonte de predição ampliado, por exemplo, igual ao número de pontos, desejável conforme acima descrito, leva a necessidade de representação da posição do ônibus i dentro do circuito fechado BRT, não só em relação a determinado ponto k mas também em relação à determinada volta. Esta representação da volta dentro do circuito BRT, associada a determinado ônibus i e ponto k , não aparece em trabalhos anteriores e será descrita a seguir.

Neste trabalho, o índice m é utilizado para representar a volta dentro do circuito BRT. A representação conjunta da volta associada ao ponto é feita através do índice ω , na forma:

$$\omega = (k, m) \quad (4.11)$$

onde m : índice da volta dentro do circuito fechado BRT;

ω : índice para representação da volta m associada ao ponto k .

Devido aos índices " $i-1,k$ ", " $i,k-1$ " e " $i+1,k-1$ " que aparecem nas Equações (4.1) à (4.10), e da necessidade de representação da volta associada ao ponto dentro do circuito BRT, definem-se os seguintes operadores (para $n_N \leq n_K$):

$$\langle i, \omega^- \rangle = \begin{cases} i, (k-1, m) & \text{se } k > 1 \\ i, (n_K, m-1) & \text{se } k = 1 \end{cases} \quad (4.12)$$

$$\langle i^-, \omega \rangle = \begin{cases} i-1, (k, m) & \text{se } i > 1 \\ n_I, (k, m-1) & \text{se } i = 1 \end{cases} \quad (4.13)$$

$$\langle i^+, \omega^- \rangle = \begin{cases} i+1, (k-1, m) & \text{se } i < n_I, k > 1 \\ i+1, (n_K, m-1) & \text{se } i < n_I, k = 1 \\ 1, (k-1, m+1) & \text{se } i = n_I, k > 1 \\ 1, (n_K, m) & \text{se } i = n_I, k = 1 \end{cases} \quad (4.14)$$

Utilizando-se a representação da volta m associada ao ponto k (índice ω), as Equações (4.1) à (4.10) da função custo e restrições do modelo inicial, são reescritas como:

$$f = \sum_{i \in I} \sum_{\omega \in N_i} \left[\frac{\lambda_k}{2} \left(d_{i,\omega} - d_{\langle i^-, \omega \rangle} \right)^2 + (1 - q_k) l_{\langle i, \omega^- \rangle} (h_{i,\omega} + s_{i,\omega}) \right] \quad (4.15)$$

sujeita as restrições

$$d_{i,\omega} = d_{i,\omega}^* \quad i \in I, \omega \in S_i \quad (4.16)$$

$$l_{i,\omega} = l_{i,\omega}^* \quad i \in I, \omega \in S_i \quad (4.17)$$

$$a_{i,\omega} = d_{\langle i, \omega^- \rangle} + r_k \quad i \in I, \omega = (k, m) \in N_i \quad (4.18)$$

$$s_{i,\omega}^{emb} = \frac{C_0 + C_1 \lambda_k \left(a_{i,\omega} - d_{\langle i^-, \omega \rangle} \right)}{(1 - C_1 \lambda_k)} \quad i \in I, \omega = (k, m) \in N_i \quad (4.19)$$

$$s_{i,\omega}^{des} = C_0 + C_2 q_k l_{\langle i, \omega^- \rangle} \quad i \in I, \omega = (k, m) \in N_i \quad (4.20)$$

$$s_{i,\omega} = \max(s_{i,\omega}^{emb}, s_{i,\omega}^{des}) \quad i \in I, \omega \in N_i \quad (4.21)$$

$$d_{i,\omega} = a_{i,\omega} + s_{i,\omega} + h_{i,\omega} \quad i \in I, \omega \in N_i \quad (4.22)$$

$$d_{i,\omega} \leq d_{\langle i^+, \omega^- \rangle} + r_k - e_{\min} \quad i \in I, \omega = (k, m) \in N_i \quad (4.23)$$

$$h_{i,\omega} \leq h_{\max} \quad i \in I, \omega \in N_i \quad (4.24)$$

$$l_{i,\omega} = \lambda_k \left(d_{i,\omega} - d_{\langle i^-, \omega \rangle} \right) + (1 - q_k) l_{\langle i, \omega^- \rangle} \quad i \in I, \omega = (k, m) \in N_i \quad (4.25)$$

$$a_{i,\omega}, s_{i,\omega}, h_{i,\omega} \geq 0 \quad i \in I, \omega \in N_i \quad (4.26)$$

$$d_{i,\omega}, l_{i,\omega} \geq 0 \quad i \in I, \omega \in N_i \cup S_i \quad (4.27)$$

- onde $d_{i,\omega}$: instante de partida do ônibus i do ponto k e volta m [s];
- $a_{i,\omega}$: instante de chegada do ônibus i ao ponto k e volta m [s];
- $l_{i,\omega}$: número de passageiros embarcados no ônibus i quando da partida do ponto k e volta m ;
- $h_{i,\omega}$: tempo de retenção do ônibus i no ponto k e volta m [s];
- $s_{i,\omega}$: maior valor dentre os tempos de embarque e desembarque de passageiros do ônibus i no ponto k e volta m [s];
- $s_{i,\omega}^{emb}$: tempo de embarque de passageiros no ônibus i , ponto k e volta m [s];
- $s_{i,\omega}^{des}$: tempo de desembarque de passageiros do ônibus i , ponto k e volta m [s];
- S_i : conjunto de pontos do ônibus i com valores iniciais $d_{i,\omega}^*$ e $l_{i,\omega}^*$ conhecidos;
- $d_{i,\omega}^*$: instante de partida do ônibus i do ponto k e volta m com valor inicial conhecido [s];
- $l_{i,\omega}^*$: número de passageiros embarcados no ônibus i quando da partida do ponto k e volta m com valor inicial conhecido [s].

A restrição não linear da Equação (4.21) pode ser expressa por uma série de inequações lineares através da utilização de variáveis inteiras:

$$\left. \begin{aligned} s_{i,\omega} &\geq s_{i,\omega}^{emb} \\ s_{i,\omega} &\geq s_{i,\omega}^{des} \\ s_{i,\omega} &\leq s_{i,\omega}^{emb} + C_3(1 - y_{i,\omega}) \\ s_{i,\omega} &\leq s_{i,\omega}^{des} + C_3 y_{i,\omega} \end{aligned} \right\} \quad i \in I, \omega \in N_i \quad (4.28)$$

e

$$y_{i,\omega} \in \{0,1\} \quad i \in I, \omega \in N_i \quad (4.29)$$

- onde $y_{i,\omega}$: variável binária;
- C_3 : constante positiva suficientemente grande.

Para $y_{i,\omega}=1$ a Equação (4.28) implica em $s_{i,\omega} = s_{i,\omega}^{emb}$ e para $y_{i,\omega}=0$ implica em

$s_{i,\omega} = s_{i,\omega}^{des}$. Um valor suficientemente grande para C_3 é dado por:

$$C_3 = \max\{s_{i,\omega}^{+des} - s_{i,\omega}^{-des}, s_{i,\omega}^{+emb} - s_{i,\omega}^{-emb} : i \in I, \omega \in N_i\} \quad (4.30)$$

onde $s_{i,\omega}^{+emb}$: limite superior para $s_{i,\omega}^{emb}$ [s];

$s_{i,\omega}^{+des}$: limite superior para $s_{i,\omega}^{des}$ [s];

$s_{i,\omega}^{-emb}$: limite inferior para $s_{i,\omega}^{emb}$ [s];

$s_{i,\omega}^{-des}$: limite inferior para $s_{i,\omega}^{des}$ [s].

Conforme indicado na Equação (4.15), a função custo, devido à dependência de $l_{i,\omega}$ em relação à $d_{i,\omega}$ e portanto, $h_{i,\omega}$ e $s_{i,\omega}$, é não convexa (com vários mínimos locais), e a restrição da Equação (4.21) é não linear. Isto implica num problema de programação matemática não linear, ou programação não linear inteira mista no caso de utilização das Equações (4.28) e (4.29), o que adiciona uma complexidade indesejável na resolução do problema de otimização, sem garantias de obtenção de um mínimo global. Esta dificuldade associada às características de cenários BRT típicos, com razoável número de ônibus e pontos, podem levar a impossibilidade de uma solução satisfatória em tempo real para o problema de controle de retenção.

Alguns trabalhos, como por exemplo Eberlein *et al.* (2001), Hickman (2001) e Zolfaghari *et al.* (2004), não consideram a segunda parcela na função custo, ou seja, não consideram o atraso dos passageiros embarcados, o que garante a convexidade. Outros, como o trabalho de Sun e Hickman (2004), consideram somente o processo de embarque de passageiros nos ônibus, o que elimina a restrição não linear associada à escolha do processo mais lento, embarque ou desembarque. Entretanto, entende-se que para um modelo realista do sistema BRT, o atraso dos passageiros embarcados no ônibus e a possibilidade de escolha entre o processo de embarque e desembarque de passageiros, não podem ser desprezados.

4.4 Método de Solução por Aproximação de Modelo - MSAM

Para uma solução ou otimização eficiente em tempo real, dada a complexidade do modelo inicial proposto nas Equações (4.1) à (4.10) e do modelo ampliado proposto nas Equações (4.11) à (4.30), constituídos de uma função custo não convexa e restrição não

linear (programação não linear), o problema de controle de retenção é resolvido de acordo com o procedimento apresentado em Koehler *et al.* (2008a). Este procedimento é reescrito para compatibilidade com o modelo ampliado do sistema BRT aqui apresentado, e descrito a seguir. As simplificações, aproximações e características resultantes do procedimento adotado, aqui denominado MSAM (Método de Solução por Aproximação de Modelo), devem, além de manter o aspecto realista do modelo do sistema BRT, permitir uma solução eficiente em tempo real.

No procedimento adotado, antes do processo de otimização, são geradas estimativas para os parâmetros das Equações (4.18), (4.19), (4.20), (4.21), (4.22) e (4.25), considerando-se uma retenção nula $h_{i,\omega}^{est} = 0$ para todos os ônibus em todos os pontos dentro do horizonte de predição N_i . Estas estimativas resultam em valores conhecidos para as variáveis do modelo: $a_{i,\omega}^{est}$, $s_{i,\omega}^{emb-est}$, $s_{i,\omega}^{des-est}$, $s_{i,\omega}^{est}$, $d_{i,\omega}^{est}$ e $l_{i,\omega}^{est}$. A partir destas estimativas iniciais, o modelo é simplificado conforme descrito a seguir:

- Substitui-se a variável $l_{i,\omega}$ da função custo da Equação (4.15) pelo valor estimado $l_{i,\omega}^{est}$ (constante), o que elimina o produto da variável $l_{i,\omega}$ pela variável de controle $h_{i,\omega}$ e pela variável $s_{i,\omega}$, garantindo a convexidade da função custo. Assim, a função custo do modelo ampliado, Equação (4.15), é reescrita como:

$$f = \sum_{i \in I} \sum_{\omega \in N_i} \left[\frac{\lambda_k}{2} \left(d_{i,\omega} - d_{\langle i^-, \omega \rangle} \right)^2 + (1 - q_k) l_{\langle i, \omega^- \rangle}^{est} (h_{i,\omega} + s_{i,\omega}) \right] \quad (4.31)$$

- A partir das estimativas determina-se o maior valor dentre as operações de embarque $s_{i,\omega}^{emb-est}$ ou desembarque $s_{i,\omega}^{des-est}$ de passageiros do ônibus, para todos os pontos do horizonte de predição N_i considerado. Somente a restrição $s_{i,\omega}^{est}$ predominante ou procedimento mais demorado, é considerado como restrição no processo de otimização, o que elimina a escolha através da restrição não linear da Equação (4.21). Ou seja,

$$s_{i,\omega} = \begin{cases} s_{i,\omega}^{emb} & se \quad s_{i,\omega}^{emb-est} \geq s_{i,\omega}^{des-est} \\ s_{i,\omega}^{des} & se \quad s_{i,\omega}^{emb-est} < s_{i,\omega}^{des-est} \end{cases} \quad i \in I, \omega \in N_i \quad (4.32)$$

No modelo ampliado, a escolha entre $s_{i,\omega}^{emb-est}$ ou $s_{i,\omega}^{des-est}$ é feita durante o processo de otimização, baseada na restrição não linear da Equação (4.21). No MSAM a escolha é feita antes do processo de otimização, a partir dos valores estimados $s_{i,\omega}^{emb-est}$, $s_{i,\omega}^{des-est}$ e da Equação (4.32). A operação selecionada, embarque ou desembarque, e portanto a Equação associada, (4.19) ou (4.20), é uma restrição linear e elimina a Equação (4.21) do processo de otimização no MSAM.

Portanto, o modelo do sistema BRT no MSAM apresenta uma função custo quadrática (convexa), conforme Equação (4.31), com restrições lineares, Equações (4.16) à (4.27), com Equação (4.21) eliminada através da Equação (4.32). Assim, o problema de otimização no MSAM (programação quadrática), pode ser representado como:

$$\min_x f(x) = \frac{1}{2} x^T Q x + c^T x \quad (4.33)$$

sujeita a,

$$Ax \leq b \quad (4.34)$$

$$A_{eq}x = b_{eq} \quad (4.35)$$

$$l_b \leq x \leq u_b \quad (4.36)$$

onde x , b , b_{eq} , l_b , e u_b são vetores, A e A_{eq} são matrizes e $f(x)$ é uma função que retorna um escalar e Q uma matriz positiva semidefinida. O vetor x é composto pelas variáveis $a_{i,\omega}$, $s_{i,\omega}$, $d_{i,\omega}$ e $h_{i,\omega}$ para todos os ônibus i e pontos k do horizonte de predição N_i . Os vetores l_b e u_b contém respectivamente os valores mínimos e máximos para as variáveis do vetor x . Ou seja, deseja-se obter os valores da variável de controle $h_{i,\omega}$ (ou retenção), para todo o horizonte de predição N_i , que implique no mínimo da função custo da Equação (4.31), sujeita as restrições lineares das Equações (4.16) até (4.27) com a Equação (4.21) eliminada pela Equação (4.32).

As simplificações utilizadas no MSAM permitem a obtenção da solução ótima global para $h_{i,\omega}$ de forma bastante facilitada, através de técnicas de programação quadrática. Entretanto, devido à simplificação do modelo ampliado, a solução via MSAM apresenta um desvio em relação ao ótimo global do modelo ampliado (problema de programação não linear). Para minimizar possíveis erros associados ao MSAM, um processo iterativo é utilizado (Koehler *et al.*, 2008a), conforme descrito a seguir:

1. Uma primeira iteração conforme anteriormente descrito: estimativa inicial com

- $h_{i,\omega}^{est} = 0$ seguida de otimização (programação quadrática) para determinação das variáveis de controle de retenção $h_{i,\omega}$.
2. Nova iteração: nova estimativa com os $h_{i,\omega}^{est}$ iguais aos valores encontrados para as variáveis de controle de retenção $h_{i,\omega}$ na primeira iteração, seguida de otimização (programação quadrática) para determinação das novas variáveis de controle $h_{i,\omega}$.
 3. Repete o passo 2 até as variáveis de controle $h_{i,\omega}$ convergirem segundo o critério da Equação (4.37) ou o número de iterações alcançar o máximo especificado (n^0 de iterações $\leq n^0$ máximo de iterações):

$$|h_{i,\omega}(p) - h_{i,\omega}(p-1)| \leq \varepsilon \quad i \in I, \omega \in N_i \quad (4.37)$$

onde p : índice da iteração;

ε : Tolerância máxima [s].

Os dados iniciais do sistema BRT necessários para determinação das variáveis de controle de retenção (valores otimizados), são o instante de partida $d_{i,\omega}^*$ dos ônibus do último ponto visitado (e anteriores se necessário) e o número de passageiros embarcados nos ônibus $l_{i,\omega}^*$ quando da partida do último ponto visitado. O procedimento aqui proposto no MSAM para solução do problema de retenção ou determinação das variáveis de controle de retenção $h_{i,\omega}$ pode ser resumido no algoritmo abaixo como:

$p=1$

$h_{i,\omega}^{est}(p) = 0$ para todo $i \in I, \omega \in N_i$

geração das estimativas

otimização: Equação (4.31) sujeita as restrições lineares $\Rightarrow h_{i,\omega}(p) = h_{i,\omega}$

repete

$p = p+1$

$h_{i,\omega}^{est}(p) = h_{i,\omega}(p-1)$

geração das estimativas

otimização: Equação (4.31) sujeita as restrições lineares $\Rightarrow h_{i,\omega}(p) = h_{i,\omega}$

enquanto $|h_{i,\omega}(p) - h_{i,\omega}(p-1)| > \varepsilon$ e n^0 de iterações $\leq n^0$ máximo de iterações

$h_{i,\omega} = h_{i,\omega}(p)$

Os valores ótimos obtidos via MSAM para as variáveis de controle de retenção $h_{i,\omega}$,

mesmo após várias iterações e convergência, ainda serão diferentes dos valores ótimos globais de $h_{i,\omega}$ obtidos via modelo ampliado. Esta diferença é devida às diferenças entre os modelos utilizados, mais especificamente entre as funções custo das Equações (4.15) e (4.31) e entre as restrições das Equações (4.21) e (4.32). Entretanto, de acordo com o verificado nas simulações realizadas, esta diferença, após poucas iterações, tende a se reduzir a valores da ordem de poucos segundos. Entende-se que estes possíveis desvios, considerando-se as várias simplificações e aproximações utilizadas na construção dos modelos (inicial, ampliado e via MSAM) e a dinâmica do sistema BRT, justificam plenamente a utilização do MSAM aqui proposto.

As ações de controle de retenção $h_{i,\omega}$ realmente implementadas estão relacionadas com o primeiro ponto k de cada ônibus i dentro do horizonte de predição, ou $N_i^{N=1}$. As demais ações de controle $h_{i,\omega}$ relativas a pontos k para $N>1$, apesar de consideradas na função custo, não são implementadas, visto que são uma projeção futura da ação de controle. Uma vez implementadas as ações de controle de retenção para $N_i^{N=1}$, os valores iniciais $d_{i,\omega}^*$ e $l_{i,\omega}^*$ relativos aos últimos pontos visitados pelos ônibus são atualizados e novas ações de controle calculadas (via MSAM) para o novo horizonte de predição N_i considerado. E assim sucessivamente. Isto é, considera-se um horizonte de predição rolante com atualização dos valores iniciais $d_{i,\omega}^*$ e $l_{i,\omega}^*$ e novo cálculo da ação de controle de retenção $h_{i,\omega}$.

4.5 Validação do MSAM

Um exemplo, com o objetivo de validação via simulação do MSAM, é apresentado a seguir. O cenário utilizado é constituído de um sistema BRT conforme indicado na Figura 4.1, com uma pista exclusiva de mão única, operando numa rota fechada, aqui composto por 5 ônibus e 10 pontos. O objetivo é o cálculo da ação de controle de retenção $h_{i,\omega}$ para o primeiro ponto a jusante de cada ônibus ($N_i^{N=1}$), considerando-se um horizonte de n_N pontos de predição a jusante de cada ônibus, que implique no menor custo de operação ou atraso do sistema BRT. Ou seja, apesar de um horizonte de predição $n_N>1$, cada ônibus se desloca um ponto dentro do circuito BRT. Os dados do sistema BRT utilizados para a simulação são: $n_I=5$, $n_K=10$, $n_N=10$, $C_0=12$, $C_1=0,48$, $C_2=0,42$, $e_{min}=0$, $h_{max}=\infty$, $v_{bus}=60$ km/h (velocidade dos ônibus), $\lambda(k)=[0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0,2]$, $q(k)=[0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0,2]$, $r(k)=[60 \ 60 \ 60 \ 60 \ 60 \ 60 \ 60 \ 60 \ 60 \ 60]$.

As matrizes $D_{i,\omega}^*$ e $L_{i,\omega}^*$ contêm os valores iniciais $d_{i,\omega}^*$ e $l_{i,\omega}^*$ (valores não especificados = “-”), onde as linhas representam os ônibus i , as colunas os pontos k e m a volta dentro do circuito fechado do sistema BRT.

$$D_{i,(k,l)}^* = \begin{bmatrix} - & - & - & - & - & - & - & - & 60 & 130 \\ - & - & - & - & - & - & 60 & 130 & - & - \\ - & - & - & - & 0 & 70 & - & - & - & - \\ - & - & 60 & 130 & - & - & - & - & - & - \\ 60 & 130 & - & - & - & - & - & - & - & - \end{bmatrix}$$

$$L_{i,(k,l)}^* = \begin{bmatrix} - & - & - & - & - & - & - & - & - & 20 \\ - & - & - & - & - & - & - & 20 & - & - \\ - & - & - & - & - & 20 & - & - & - & - \\ - & - & - & 20 & - & - & - & - & - & - \\ - & 20 & - & - & - & - & - & - & - & - \end{bmatrix}$$

Conforme verificado na matriz $D_{i,\omega}^*$ e ilustrado na Figura 4.3, o ônibus $i=3$, quando da partida do ponto $k=6$ e volta $m=1$, ou seja $d_{3,(6,1)}^*=70$ s, está adiantado em relação ao espaçamento (*headway*) entre os demais ônibus do sistema BRT. Ou seja, está mais próximo do ônibus $i=2$ e mais distante do ônibus $i=4$. Este desvio, se não corrigido, gera um atraso adicional aos usuários do sistema BRT e aumento dos custos de operação.

A utilização do MSAM na solução do problema de controle de retenção para o exemplo aqui apresentado, leva aos resultados para a variável de controle de retenção $h_{i,\omega}$, conforme indicado na Tabela 4.1. Estão indicados os valores de $h_{i,\omega}$ para cinco iterações, sendo que o critério de convergência foi desconsiderado. Os pontos pertencentes ao horizonte de predição N_i com valores de ação de controle $h_{i,\omega}$ nulos ($h_{i,\omega}=0$), não aparecem indicados na Tabela 4.1.

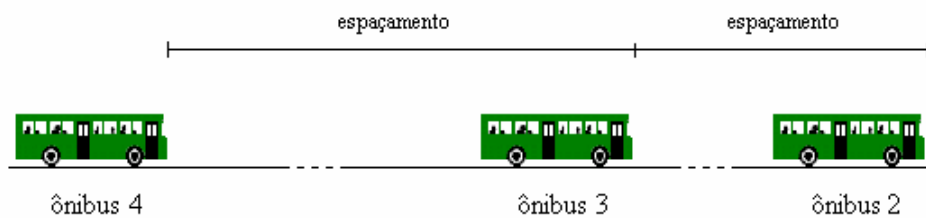


Figura 4.3. Representação do espaçamento ou *headway* entre os ônibus 2, 3 e 4 para o cenário BRT utilizado

Conforme os resultados apresentados na Tabela 4.1, a convergência de $h_{i,\omega}$, da

ordem de segundo ($\varepsilon \leq 1$), se dá na terceira para quarta iteração. Neste caso, para $\varepsilon = 1$ [s], a ação de controle a ser implementada (MSAM) é uma retenção de 69,1 s para o ônibus $i=3$ no ponto $k=7$, volta $m=1$ ($h_{3,(7,1)}$) e de 1,1 s para o ônibus $i=5$ no ponto $k=3$, volta $m=1$ ($h_{5,(3,1)}$), com demais $h_{i,\omega}=0$. Apesar de não indicado na Tabela 4.1, a convergência de $h_{i,\omega}$ é verificada para todos os pontos do horizonte de predição N_i de cada ônibus. O arquivo de saída do programa MSAM (MatLab) para este exemplo, com a indicação das matrizes das variáveis de controle $h_{i,\omega}$, é apresentado no Apêndice 1.

Tabela 4.1. Valores calculados via MSAM para $h_{i,\omega}$ considerando várias iterações ($n_N=10$)

Iteração	$h_{i,(k,m)}$ [s]
1	$h_{3,(7,1)} = 89,5$ $h_{5,(3,1)} = 3,0$
2	$h_{3,(7,1)} = 65,7$ $h_{5,(3,1)} = 1,0$
3	$h_{3,(7,1)} = 69,8$ $h_{5,(3,1)} = 1,1$
4	$h_{3,(7,1)} = 69,1$ $h_{5,(3,1)} = 1,1$
5	$h_{3,(7,1)} = 69,2$ $h_{5,(3,1)} = 1,1$

Nota: valores não especificados para $h_{i,\omega}$ considerar $h_{i,\omega}=0$

A melhor solução encontrada para a variável de controle, calculada por simulação via discretização do tempo ($\Delta t=0,1$ s), a partir do modelo ampliado, é $h_{3,(7,1)} = 67,6$ s e $h_{5,(3,1)} = 0,1$ s com demais $h_{i,\omega}=0$. Esta solução obtida via simulação demanda grande esforço computacional e mostra-se impraticável para um controle de retenção em tempo real. A solução encontrada a partir do modelo ampliado, com a restrição não linear da Equação (4.21) substituída pelo conjunto de restrições lineares da Equação (4.28), utilizando-se formulação AMPL e algoritmos de programação não linear inteira mista do NEOS (*Network Enabled Optimization System*), é a mesma da obtida via simulação (ver Apêndice 2).

O custo ou atraso total do sistema BRT para o horizonte considerado ($n_N=10$), ou atraso total dos passageiros nos pontos e embarcados, é calculado, tanto no modelo ampliado como no MSAM, através da Equação (4.15), relativa a função custo do modelo ampliado. O que difere são os valores das variáveis $h_{i,\omega}$, $d_{i,\omega}$, $a_{i,\omega}$, $s_{i,\omega}$ e $l_{i,\omega}$ utilizados, obtidos através de simulação no modelo global ou através do MSAM. A Tabela 4.2 apresenta uma comparação do atraso total do sistema BRT para a variável de controle (e

demais variáveis do sistema BRT) obtida como: modelo ampliado (via simulação), via AMPL/NEOS, via MSAM e sem ação de controle ou $h_{i,\omega}=0$.

Como pode ser observado na Tabela 4.2, a ação de controle de retenção $h_{i,\omega}$ obtida via MSAM implica num atraso total do sistema BRT muito próximo do obtido via modelo ampliado, com uma diferença de apenas +0,01%. Ainda, a ação de controle obtida via MSAM permite uma redução de -15 % no atraso total do sistema BRT quando comparado com o atraso total obtido com ação de controle nula ou $h_{i,\omega}=0$. Importante ressaltar que esta redução no atraso total vale para o exemplo e cenários utilizados e varia para cenários distintos. Para outros cenários testados a solução via MSAM apresentou resultados, quando comparados com a solução obtida a partir do modelo ampliado (via simulação), tão positivos quanto os aqui apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Atraso total do sistema BRT (para $n_N=10$)

Modelo utilizado para cálculo de $h_{i,\omega}$	Ação de controle $h_{i,\omega}$ [s]	Atraso total BRT [s] Equação (4.15)
Ampliado (por simulação)	$h_{3,(7,1)} = 67,6$ $h_{5,(3,1)} = 0,1$	289.410,5
Ampliado (via AMPL/NEOS)	$h_{3,(7,1)} = 67,6$ $h_{5,(3,1)} = 0,1$	289.410,5
MSAM (otimização)	$h_{3,(7,1)} = 69,1$ $h_{5,(3,1)} = 1,1$	289.448,4
Ação de controle nula	$h_{i,\omega} = 0$	339.365,9

4.6 Influência dos Parâmetros $h_{máx}$ e n_N

A influência dos parâmetros $h_{máx}$ e n_N do sistema BRT, sobre a ação de controle de retenção $h_{i,\omega}$ e o atraso total do sistema BRT, é analisada via simulação e discutida a seguir. O exemplo utiliza o mesmo cenário e dados históricos, iniciais e horizonte de predição do exemplo anterior. Os resultados, para $\varepsilon=1$ [s], estão apresentados na Tabela 4.3.

Pode-se observar na Tabela 4.3 que uma limitação ou redução nos valores de $h_{máx}$ e ou n_N levam a um aumento do atraso total do sistema BRT quando comparado com o atraso total para $h_{máx}=\infty$ e $n_N=n_K$. Entende-se que este aumento do atraso total em função da redução ou limitação de $h_{máx}$ e ou n_N pode ser considerado como uma regra geral, que pode ser estendida para diferentes cenários.

A magnitude do impacto desta redução ou limitação sobre o atraso total depende sim, do cenário e parâmetros utilizados. Observa-se também que a limitação de $h_{máx}$, no

caso $h_{máx}=30$ e $n_N=10$, implica numa diluição da ação de controle de retenção $h_{i,\omega}$ em outros pontos do horizonte de predição considerado. Esta diluição da ação de controle só é possível no modelo ampliado e MSAM aqui descritos e utilizados. Importante observar que na Tabela 4.3, mesmo quando reduzido o horizonte de predição n_N no cálculo da ação de controle de retenção, o cálculo do atraso total do sistema BRT sempre considera um horizonte de predição com $n_N=10$.

Tabela 4.3. Influência dos parâmetros $h_{máx}$ e n_N sobre a ação de controle $h_{i,\omega}$ e o atraso total do sistema BRT (para $n_N=10$)

Parâmetros	Ação de controle $h_{i,\omega}$ [s]	Convergência (nº da iteração)	Atraso total BRT [s] (para $n_N=10$)
$h_{máx} = \inf$ $n_N=10$	$h_{3,(7,1)} = 69,1$ $h_{5,(3,1)} = 1,1$	4	289.448,4
$h_{máx} = 30$ $n_N=10$	$h_{3,(7,1)} = 30,0$ $h_{3,(8,1)} = 30,0$ $h_{3,(9,1)} = 8,7$ $h_{5,(3,1)} = 3,1$	4	292.727,1 (+ 1,1%)
$h_{máx} = \inf$ $n_N=5$	$h_{3,(7,1)} = 41,2$	3	296.995,9 (+ 2,6%)
$h_{máx} = 30$ $n_N=5$	$h_{3,(7,1)} = 30,0$	2	304.861,3 (+ 5,3%)
$h_{máx} = \inf$ $n_N=1$	$h_{i,(k,m)} = 0$	2	339.365,9 (+ 17,2%)

4.7 Estudo de Caso: Aplicação do MSAM

O exemplo apresentado a seguir também utiliza o cenário do exemplo anterior, com os mesmos dados históricos, esperados e iniciais para o sistema BRT, com $\varepsilon=1$ [s] e nº máximo de iterações = 5. O objetivo é uma análise por simulação do comportamento da ação de controle de retenção e da trajetória dos ônibus do sistema BRT para uma volta completa no circuito fechado considerado. Ou seja, cada ônibus se desloca dez pontos dentro do circuito BRT.

São simulados dois casos, sem e com (MSAM) o controle de retenção. As trajetórias dos ônibus sem e com o controle de retenção são apresentadas nas Figuras 4.4 e 4.5 respectivamente. Nos gráficos, devido à característica de circuito fechado do sistema BRT aqui utilizado, aparece a trajetória do ônibus “0”, a fim de representar o intervalo ou espaçamento entre os ônibus 1 e 5. Esta trajetória do ônibus “0” é a trajetória do ônibus 5 deslocada ou adiantada de uma volta no circuito BRT.

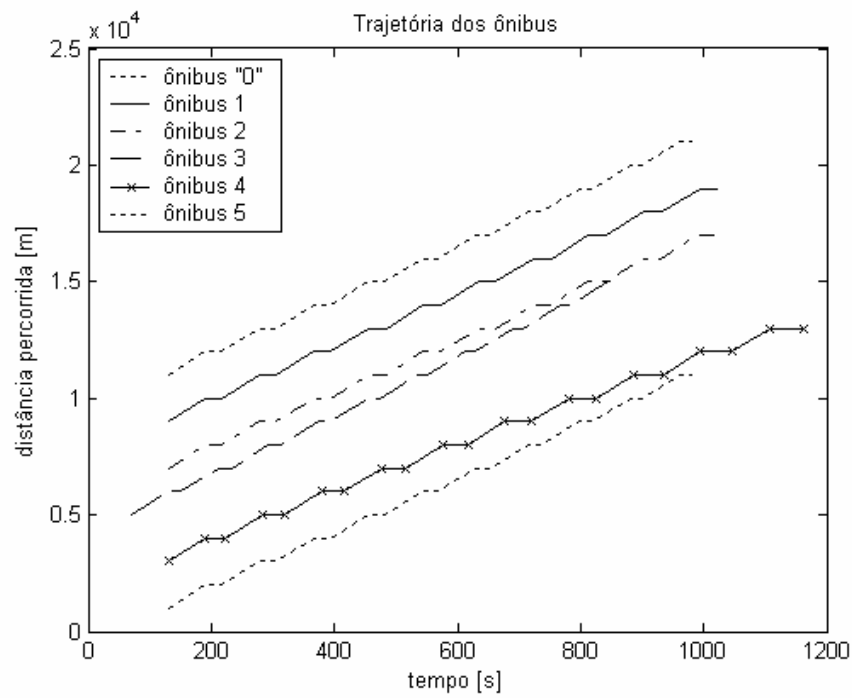


Figura 4.4. Trajetória dos ônibus do sistema BRT sem controle de retenção

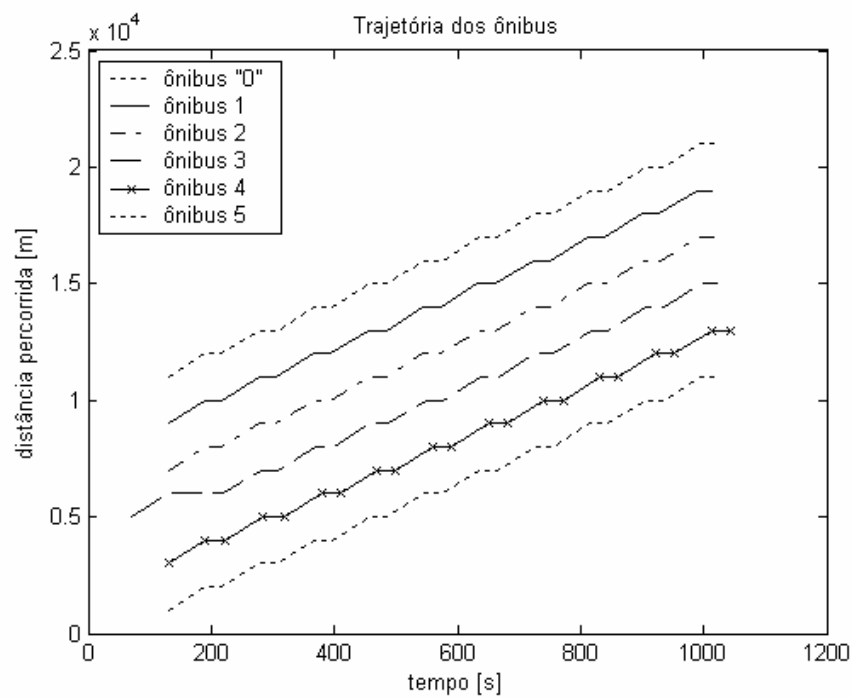


Figura 4.5. Trajetória dos ônibus do sistema BRT com controle de retenção - MSAM

Nas Figuras 4.4 e 4.5, as linhas horizontais das trajetórias dos ônibus representam o tempo de parada do ônibus nos pontos. No caso específico da Figura 4.5, este tempo de

parada do ônibus no ponto pode ou não incluir uma ação de controle de retenção adicional. Como pode ser verificado na comparação entre as Figuras 4.4 e 4.5, a presença do controle de retenção $h_{i,\omega}$ altera a trajetória dos ônibus. Na Figura 4.4, sem o controle de retenção, os ônibus tendem a se agrupar, formando pelotões (efeito *bunching*), o que aumenta o atraso dos usuários do sistema BRT e compromete seriamente o desempenho do sistema. Já com a presença do controle de retenção (MSAM), conforme indicado na Figura 4.5, a trajetória ou espaçamento entre ônibus é corrigido.

Para o exemplo apresentado as retenções $h_{i,\omega}$ implementadas (na simulação), para $N_i^{N=1}$, estão indicadas nas matrizes de controle $H_{i,(k,m)}$ abaixo, onde as linhas representam o ônibus i , as colunas o ponto k e m a volta dentro do circuito fechado do sistema BRT.

$$H_{i,(k,1)} = \begin{bmatrix} - & - & - & - & - & - & - & - & - & - \\ - & - & - & - & - & - & - & - & 0 & 0 \\ - & - & - & - & - & - & 69,1 & 0 & 0 & 0 \\ - & - & - & - & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ - & - & 1,1 & 0 & 0,6 & 1,1 & 2,5 & 1,4 & 3,1 & 1,7 \end{bmatrix}$$

$$H_{i,(k,2)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & - & - \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & - & - & - & - \\ 0 & 0 & 0 & 0 & - & - & - & - & - & - \\ 2,9 & 2,2 & - & - & - & - & - & - & - & - \end{bmatrix}$$

Para cada ônibus i do sistema BRT, representado por uma linha da matriz de controle $H_{i,(k,m)}$, aparecem indicadas as dez ações de controle de retenção $h_{i,\omega}$ implementadas ($N_i^{N=1}$), relativas aos dez pontos k dentro do circuito fechado do sistema BRT. Importante salientar que para cada uma das ações de controle implementadas, utilizou-se um horizonte de predição de dez pontos a jusante, ou $n_N=10$. As ações de controle relativas a estes pontos com $N>1$, apesar de consideradas na função custo e no processo de otimização, não são implementadas e não aparecem indicadas, visto que são uma projeção futura da ação de controle. Pode-se verificar também que a característica do circuito fechado do sistema BRT exige a representação da volta m associada ao ponto k , conforme representação no modelo ampliado e MSAM aqui apresentados.

A Tabela 4.4 apresenta os resultados da simulação para o custo ou atraso total do sistema BRT, constituído pelo atraso dos passageiros nos pontos e embarcados, para uma volta completa dos ônibus no circuito fechado, um percurso de aproximadamente 15

minutos. O custo ou atraso total é aqui calculado, via Equação (4.15) (modelo ampliado), somente para os pontos com ação de controle de retenção realmente implementadas (na simulação), ou $N_i^{N=1}$. Pode-se observar que a ação de controle de retenção reduziu em 14% o atraso total dos passageiros ou custo do sistema BRT dentro do período considerado. Conforme indicado na Figura 4.5, a ação de controle de retenção também evita o agrupamento e ou ultrapassem entre os ônibus. O arquivo de saída do programa MSAM (MatLab) para este exemplo, com a indicação das matrizes das variáveis de controle $h_{i,\omega}$, é apresentado no Apêndice 3.

Tabela 4.4. Comparativo do custo ou atraso total do sistema BRT sem e com controle de retenção (MSAM) para uma volta completa no circuito

Controle de retenção	Atraso total BRT [s]
Não	339.365,9
Sim	292.186,1 (-14 %)

4.8 Comentários sobre o MSAM

A aplicação do MSAM (Método de Solução por Aproximação de Modelo), no controle do sistema BRT do exemplo aqui apresentado, e outros exemplos testados, apresenta solução para a variável de controle de retenção muito próxima à solução obtida para o modelo ampliado (programação não linear) via simulação, com uma diferença insignificante face à dinâmica do sistema BRT. A convergência da variável de controle de retenção, no MSAM, ocorreu em poucas iterações, com um tempo de processamento compatível com aplicações de controle de retenção em tempo real.

CAPÍTULO 5

CONTROLE INTEGRADO DE PRIORIDADE E RETENÇÃO PARA SISTEMAS BRT

5.1 Introdução

Idealmente, sistemas BRT deveriam operar sem pontos de interseção com vias de tráfego convencional (veículos que não ônibus do sistema BRT), porém tal solução apresenta custos proibitivos em cenários urbanos já bastante adensados. Com a presença destas interseções entre a(s) faixas segregadas do sistema BRT e as vias de tráfego convencional, torna-se necessário a semaforização das interseções, o que pode implicar num atraso adicional para os ônibus e usuários do sistema BRT e maior custo para o operador do sistema. Assim, surge a necessidade de implementação de estratégias de prioridade para os ônibus do sistema BRT nas interseções semaforizadas.

De forma geral, a prioridade facilita o movimento dos ônibus através das interseções, reduzindo os atrasos e o tempo de viagem. Podem-se citar ainda como benefícios uma melhor aderência ao plano de horários e ou espaçamento (*headway*), redução de paradas (diminuindo desgaste e quebra do equipamento), aumento do conforto para o motorista e passageiros, redução da emissão de poluentes, etc. Entretanto, se não for bem projetada, a prioridade pode causar impactos negativos no tráfego em geral, que podem levar inclusive a um aumento do tempo de viagem dos ônibus (Heydecker, 1983). Um exemplo negativo seria a concessão de prioridade para um ônibus do sistema BRT com um espaçamento (ou *headway*) abaixo do especificado ou abaixo do valor ótimo.

Na literatura aparecem vários trabalhos relacionados com o tema prioridade para ônibus em via arteriais ou redes de tráfego (Skabardonis *et al.*, 1998b; Garrow e Machemehl, 1998; Balke *et al.*, 2000; Cima *et al.*, 2000; Duerr, 2000; Furth e Muller, 2000; Dion e Hellinga, 2001; Nash e Sylvia, 2001; Janos e Furth, 2002; Dion *et al.* 2004 e outros). Outros trabalhos tratam do tema específico faixas de ônibus com prioridade intermitente ou BLIP (do inglês *bus lanes with intermittent priority*) (Jacques, 1997; Viegas e Lu, 2001; Eichler e Daganzo, 2005; Todd *et al.*, 2006 e outros). Outros ainda tratam do tema faixa para salto de fila (do inglês *queue jump lane*) (Hunter-Zaworski *et al.*,

1995; TRB, 2000; Mirabdal e Thesen, 2002). Entretanto, dentro das estratégias de controle tempo real aplicadas a sistemas de transporte público urbano, considerando-se um serviço normal sujeito a pequenos desvios e pequenas perturbações no espaçamento entre ônibus, desconhece-se uma estratégia de controle específica para sistemas BRT, que integre o controle de prioridade e retenção.

Nesse contexto, apresenta-se aqui o modelo de uma estratégia de controle integrado de prioridade e retenção para sistemas BRT. Esta integração trabalha em dois níveis: um nível local, referente à temporização semafórica ou alocação das fases BRT nas interseções, com possibilidade de prioridade para os ônibus, e um nível global, referente ao controle do espaçamento entre os ônibus via retenção nos pontos. A estratégia de controle de retenção é baseada no método apresentado em Koehler *et al.* (2008a), aqui revisado e apresentado no Capítulo 4 (MSAM). A integração é feita através da incorporação de restrições adicionais relativas às fases BRT, dadas pelos planos semafóricos das interseções (nível local), no cálculo dos instantes de partida dos ônibus dos pontos (nível global).

O controle integrado de prioridade e retenção, aqui denominado CIPER, assim como o MSAM apresentado no Capítulo 4, aplica-se a linhas com alta frequência de ônibus ou pequenos espaçamentos entre ônibus. Esse tipo de operação não se baseia em planos horários, o que permite usar a retenção dos ônibus nos pontos como forma de otimizar o desempenho global do sistema BRT.

5.2 Controle Integrado de Prioridade e Retenção - CIPER

O esquema do cenário típico de um sistema BRT com interseções semaforizadas, utilizado para o desenvolvimento do CIPER aqui proposto, está indicado na Figura 5.1. O modelo é constituído de uma faixa exclusiva de mão única para os ônibus, operando numa rota fechada, com semáforos controlando o fluxo de veículos nas interseções do sistema BRT com as vias de tráfego convencional (Koehler *et al.*, 2008b).

No CIPER a estratégia de prioridade (nível local) é inserida no modelo ampliado do sistema BRT (apresentado no Capítulo 4), através de restrições adicionais para os instantes de partida $d_{i,\omega}$ dos ônibus dos pontos (nível global). A solução do problema (modelo ampliado com restrições adicionais) de controle integrado de prioridade e retenção é feita via CIPER, conforme procedimento de estimativas e convergência da variável de controle adotado no MSAM e apresentado no Capítulo 4.

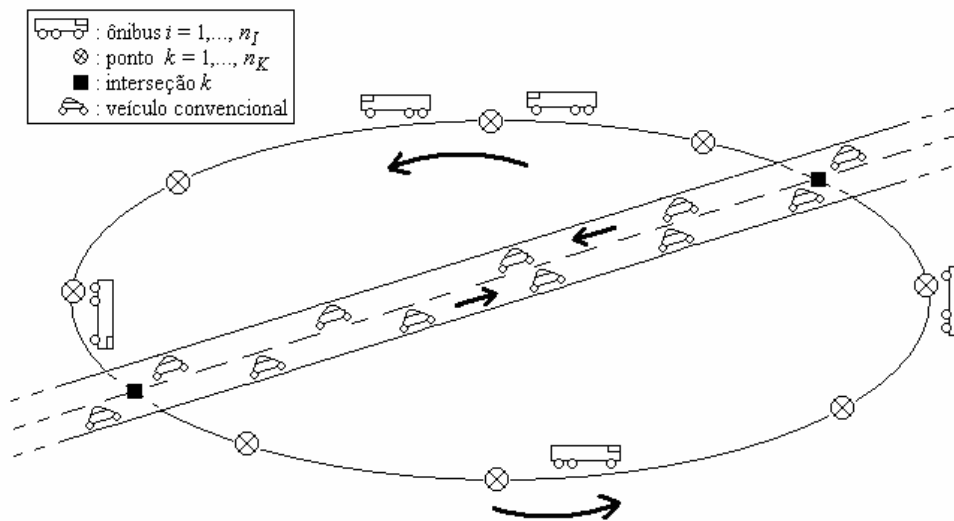


Figura 5.1. Esquema do sistema BRT com interseções semaforizadas

As restrições adicionais relativas às fases BRT só se aplicam a pontos k com interseção semaforizada k imediatamente a jusante. Esta restrição adicional tem por função evitar que os ônibus fiquem retidos nas interseções em função da sinalização, o que geraria custos adicionais na forma de aumento no consumo de combustível, poluição, desgaste do equipamento, desconforto, etc. (Koehler *et al.*, 2006a). Portanto, o modelo aqui utilizado considera que os ônibus nunca param nas interseções semaforizadas (Koehler e Kraus, 2006a, 2006b, 2009). A sincronização da passagem dos ônibus do sistema BRT pelas interseções, nas fases específicas para os ônibus dentro da seqüência de fases da sinalização, ou fases BRT, se dá pelo controle do instante de partida dos ônibus dos pontos.

O impacto da temporização semaforizada resultante da aplicação do CIPER, sobre o restante do tráfego ou tráfego convencional, não é computado diretamente. O modelo adotado no CIPER considera que as fases para os ônibus, dentro da seqüência de fases das interseções, são conhecidas (sem prioridade), ou seja, fornecidas e atualizadas pelo sistema de controle de tráfego. O sistema de controle de tráfego calcula o melhor instante para inserção das fases para o sistema BRT baseado em algum critério de desempenho (ou sistema de regras) da rede de tráfego, critério que pode ou não incluir o sistema BRT. As informações relativas às fases BRT são fornecidas para todos os ciclos (uma fase BRT por ciclo) dentro do plano de temporização de cada uma das interseções semaforizadas, para uma janela de tempo futuro. Entretanto, a implementação de determinada fase BRT, com possibilidade de adiantamento ou extensão, de acordo com o nível de prioridade

especificado, depende da trajetória dos ônibus dentro do circuito BRT.

O modelo aqui utilizado no CIPER permite os níveis de prioridade incondicional (ou preempção) e condicional para os ônibus do sistema BRT nas interseções semaforizadas, conforme descrito a seguir.

5.2.1 Prioridade Incondicional no CIPER

No caso prioridade incondicional, onde o nível de prioridade dos ônibus do sistema BRT é máximo ou absoluto (preempção), as fases BRT das interseções semaforizadas são impostas pelo sistema BRT, de forma a permitir a passagem dos ônibus pelas interseções sem necessidade de parada devido à sinalização. As fases BRT são calculadas a partir dos valores ótimos $d_{i,\omega}$, obtidos via MSAM (Capítulo 4), conforme indicado na Figura 5.2. Ou seja, no caso prioridade incondicional, não existem restrições adicionais para $d_{i,\omega}$, relativas às fases BRT e portanto, a solução via CIPER é idêntica à solução via MSAM.

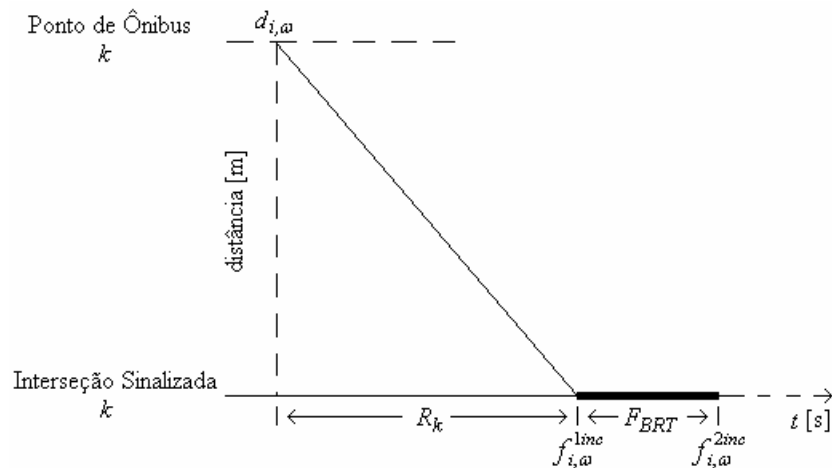


Figura 5.2. Esquema do modelo utilizado para o cálculo das fases BRT no caso prioridade incondicional

De acordo com o indicado na Figura 5.2, conhecido o instante de partida $d_{i,\omega}$ para determinado ônibus i , ponto k e volta m , dentro do horizonte de previsão N_i , com interseção semaforizada k imediatamente a jusante, o início da fase BRT para esta interseção é dado por $d_{i,\omega}$ (valores ótimos calculados via MSAM) mais o tempo R_k de viagem do ônibus do ponto k até a interseção k (o modelo pressupõe que a interseção recebe o mesmo índice k do ponto k imediatamente a montante). A fase BRT tem duração F_{BRT} constante, suficiente para garantir a passagem dos ônibus e minimizar o impacto

negativo sobre o tráfego de veículos convencionais. Portanto:

$$f_{i,\omega}^{1inc} = d_{i,\omega} + R_k \quad i \in I, \omega = (k, m) \in N_i^{N=1} \cap K^s \quad (5.1)$$

$$f_{i,\omega}^{2inc} = f_{i,\omega}^{1inc} + F_{BRT} \quad i \in I, \omega = (k, m) \in N_i^{N=1} \cap K^s \quad (5.2)$$

- onde $d_{i,\omega}$: instante de partida do ônibus i do ponto k e volta m (via MSAM) [s];
- R_k : tempo de viagem dos ônibus do ponto k até a interseção k imediatamente a jusante [s];
- F_{BRT} : duração da fase BRT [s];
- $f_{i,\omega}^{1inc}$: instante do início da fase BRT para ônibus i , ponto k , volta m e interseção k , para prioridade incondicional [s];
- $f_{i,\omega}^{2inc}$: instante do final da fase BRT para ônibus i , ponto k , volta m e interseção k , para prioridade incondicional [s];
- $N_i^{N=1}$: primeiro ponto k do horizonte de previsão N_i do ônibus i ;
- K^s : conjunto de pontos k do sistema BRT com interseção semaforizada imediatamente a jusante.

Apesar do horizonte de previsão N_i geralmente abranger vários pontos k a jusante de cada ônibus i do sistema BRT, nem todos os pontos k com interseção semaforizada k imediatamente a jusante, a implementação prática da fase BRT, só se dá para as interseções semaforizadas imediatamente a jusante do primeiro ponto k de controle de cada ônibus i ou $N_i^{N=1}$.

5.2.2 Prioridade Condicional no CIPER

No caso prioridade condicional, as fases BRT previamente fornecidas pelo sistema de controle de tráfego, mais a possibilidade de adiantamento ou extensão destas fases, geram restrições adicionais para os instantes de partida $d_{i,\omega}$ dos ônibus dos pontos com interseção semaforizada imediatamente a jusante. Estas restrições adicionais entram no procedimento de otimização, via CIPER, como limites mínimo e máximo no cálculo dos $d_{i,\omega}$ ótimos.

De acordo com o indicado na Figura 5.3, conhecido o instante do início da fase BRT $f_{n,k}^1$ para determinado ciclo n de determinada interseção semaforizada k , e conhecidos

os tempos máximos para antecipação f_{ant} e extensão f_{ext} das fases BRT, as restrições adicionais $\delta_{n,kmin}$ e $\delta_{n,kmax}$ relativas aos instantes de partida $d_{i,\omega}$ (a princípio não conhecidos) dos pontos k com interseção semaforizada k imediatamente a jusante, são calculadas como:

$$\delta_{n,kmin} = f_{n,k}^1 - f_{ant} - R_k \quad n \in N^C, k \in K^s \quad (5.3)$$

$$\delta_{n,kmax} = f_{n,k}^1 + f_{ext} - R_k \quad n \in N^C, k \in K^s \quad (5.4)$$

- onde n : índice do ciclo equivalente à determinada fase BRT;
- $\delta_{n,kmin}$: instante mínimo de partida dos ônibus do ponto k , interseção k e ciclo n [s];
- $\delta_{n,kmax}$: instante máximo de partida dos ônibus do ponto k , interseção k e ciclo n [s];
- $f_{n,k}^1$: instante do início da fase BRT no ciclo n da interseção k [s];
- $f_{n,k}^2$: instante do final da fase BRT no ciclo n da interseção k [s];
- f_{ant} : tempo máximo para antecipação da fase BRT [s];
- f_{ext} : tempo máximo para extensão da fase BRT [s];
- N^C : horizonte de ciclos n suficientemente grande para abranger todos os N_i dos ônibus i .

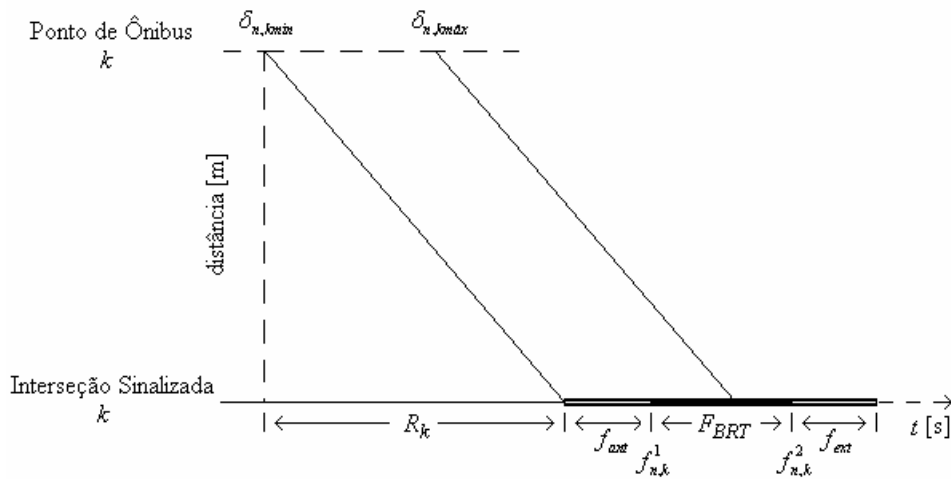


Figura 5.3. Esquema do modelo utilizado no cálculo das restrições adicionais para os $d_{i,\omega}$ no caso prioridade condicional

As restrições $\delta_{n,kmin}$ e $\delta_{n,kmax}$ (valores constantes) estabelecem os limites mínimo e máximo respectivamente, para determinado instante de partida $d_{i,\omega}$ do ônibus i , ponto k e volta m , com interseção semaforizada k imediatamente a jusante.

O nível de prioridade, dentro da prioridade condicional, está relacionado ao quanto as fases BRT, fornecidas pelo sistema de controle de tráfego, podem ser adiantadas f_{ant} ou estendidas f_{ext} . Este adiantamento ou extensão da fase BRT permite uma maior ou menor restrição ou flexibilidade no cálculo dos $d_{i,\omega}$ ótimos e assim, menor ou maior impacto sobre o tráfego convencional respectivamente.

Para compatibilidade com a estratégia de controle de retenção, que utiliza um horizonte de predição de n_N pontos a jusante de cada ônibus i do sistema BRT, as restrições $\delta_{n,kmin}$ e $\delta_{n,kmax}$ relativas aos instantes de partida $d_{i,\omega}$ dos ônibus dos pontos, também devem ser conhecidas para este horizonte ou janela de tempo futuro. Considera-se que a temporização semaforica opera de forma cíclica, com previsão da fase BRT dentro de cada ciclo n de cada interseção semaforizada k . Desta forma, cada fase BRT prevista dentro de cada ciclo n de cada interseção semaforizada k , implica em restrições ou limites mínimo $\delta_{n,kmin}$ e máximo $\delta_{n,kmax}$ para a partida dos ônibus do ponto k imediatamente a montante. Conforme indicado na Figura 5.3, estas restrições com os limites mínimo $\delta_{n,kmin}$ e máximo $\delta_{n,kmax}$ não se referem a um ônibus i específico, mas sim a um dado ciclo n . Como no caso prioridade condicional os valores de $d_{i,\omega}$ não são conhecidos antes do procedimento de otimização, não é possível associar diretamente as restrições $\delta_{n,kmin}$ e $\delta_{n,kmax}$ com determinado $d_{i,\omega}$. Assim, a escolha de quais as restrições $\delta_{n,kmin}$ e $\delta_{n,kmax}$ ou ciclo n estão associados a determinado $d_{i,\omega}$ dentro do horizonte de predição N_i , sugere uma abordagem do tipo:

- utilização de variáveis do tipo inteiro (e binário) na construção das restrições adicionais relativas às fases BRT e solução do problema de otimização via técnica de programação inteira mista;
- utilização do procedimento de estimativas (valores estimados para $d_{i,\omega}$), conforme descrito no MSAM (Capítulo 4), para escolha de quais as restrições $\delta_{n,kmin}$ e $\delta_{n,kmax}$ estão associadas a determinados $d_{i,\omega}$. Posterior inserção das restrições selecionadas no problema de otimização e solução através da utilização de técnicas de programação quadrática.

Apesar da abordagem clássica da primeira opção, esta apresenta uma complexidade computacional proibitiva para solução do problema de controle integrado de prioridade e retenção em tempo real. A segunda opção apresenta-se como uma continuação natural do procedimento utilizado no MSAM e apresentado no Capítulo 4. Por simplificação e pelas vantagens já citadas associadas ao MSAM, o sistema de controle integrado de prioridade e retenção (CIPER) aqui apresentado, faz uso da segunda opção. Portanto, a escolha das restrições $\delta_{n,kmin}$ e $\delta_{n,kmax}$ ou ciclo n associado a determinado $d_{i,\omega}$ pertencente ao horizonte de predição N_i , com interseção semaforizada k imediatamente a jusante, é feita antes do procedimento de otimização, a partir dos valores estimados para $d_{i,\omega}$ (com $h_{i,\omega}=0$), ou $d_{i,\omega}^{est-h=0}$. A Figura 5.4 ilustra este processo de escolha, não único, que deve satisfazer a relação:

$$\text{se } \delta_{n-1, km\acute{a}x} < \delta_{i, \omega}^{est-h=0} \leq \delta_{n, km\acute{a}x} \Rightarrow n_{i, \omega}^{cond} = n \quad i \in I, \omega = (k, m) \in N_i \cap K^s, n \in N^C \quad (5.5)$$

onde $d_{i,\omega}^{est-h=0}$: valores estimados via MSAM para $d_{i,\omega}$ (com $h_{i,\omega}=0$) [s];

$n_{i,\omega}^{cond}$: ciclo n associado a determinado $d_{i,\omega}^{est-h=0}$ para prioridade condicional.

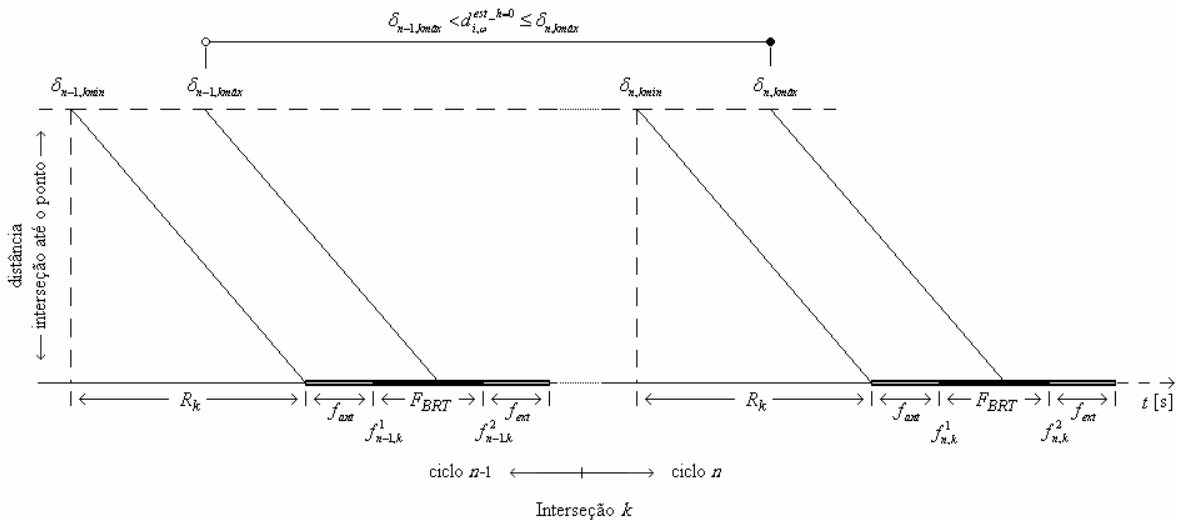


Figura 5.4. Esquema do modelo utilizado para escolha das restrições adicionais $\delta_{n,kmin}$ e $\delta_{n,kmax}$ relativas às fases BRT no caso prioridade condicional

Assim, no caso prioridade condicional, cada $d_{i,\omega}$ pertencente ao horizonte de predição N_i com interseção semaforizada k imediatamente a jusante, tem a restrição adicional relativa à fase BRT especificada como:

$$\delta_{n,kmin} \leq d_{i,\omega}^{cond} \leq \delta_{n,kmax} \quad i \in I, \omega = (k, m) \in N_i \cap K^s, n = n_{i,\omega}^{cond} \quad (5.6)$$

onde $d_{i,\omega}^{cond}$: instante de partida do ônibus i , ponto k e volta m com interseção semaforizada k imediatamente a jusante, para prioridade condicional [s].

Ou seja, a Equação (5.6) especifica, para o caso prioridade condicional, a restrição ou limites mínimo $\delta_{n,kmin}$ e máximo $\delta_{n,kmax}$ para a variável $d_{i,\omega}^{cond}$ dentro do procedimento de otimização via CIPER. O ciclo $n_{i,\omega}^{cond}$ associado a $d_{i,\omega}^{cond}$ é sempre o ciclo n , da interseção k ($\omega = (k, m)$), que implica nas restrições $\delta_{n,kmin}$ e $\delta_{n,kmax}$ que contém $d_{i,\omega}^{est-h=0}$, ou se não, o ciclo imediatamente seguinte. A possibilidade de escolha de outro ciclo n seguinte, é descartada. A existência de $d_{i,\omega}^{cond}$ dentro da restrição da Equação (5.6) é garantida para

$$h_{max} \geq C - f_{ant} - f_{ext} \quad (5.7)$$

onde C : tempo de ciclo da sinalização semafórica ou tempo entre duas fases BRT consecutivas para uma mesma interseção semaforizada k [s].

O processo de escolha das restrições $\delta_{n,kmin}$ e $\delta_{n,kmax}$ para determinado $d_{i,\omega}^{cond}$, no caso prioridade condicional, pode ser resumido como:

1. dado o início das fases BRT $f_{n,k}^1$ fornecidas pelo sistema de controle de tráfego, calcular as restrições $\delta_{n,k min}$ e $\delta_{n,k max}$, via Equações (5.3) e (5.4), para os ciclos $n \in N^C$ e pontos $k \in K^s$.
2. conhecidos os $d_{i,\omega}^{est-h=0}$ estimados para $h_{i,\omega}^{est} = 0$ (ver MSAM), escolher quais as restrições $\delta_{n,k min}$ e $\delta_{n,k max}$ estão associadas a determinado $d_{i,\omega}^{cond}$, através das Equações (5.5) e (5.6), para os ônibus $i \in I$ e pontos k do horizonte de predição $N_i \in K^s$.

Assim, o procedimento aqui proposto no CIPER para solução do problema de controle integrado de prioridade e retenção ou determinação das variáveis de controle de retenção $h_{i,\omega}^{cond}$, no caso prioridade condicional, pode ser resumido no algoritmo descrito no abaixo:

cálculo das restrições $\delta_{n,k \min}$ e $\delta_{n,k \max}$ através das Equações (5.3) e (5.4)

$p=1$

$h_{i,\omega}^{est}(p) = 0$ para todo $i \in I, \omega \in N_i$

geração das estimativas

escolha das restrições $\delta_{n,k \min}$ e $\delta_{n,k \max}$ para os $d_{i,\omega}^{cond}$ através das Equações (5.5) e (5.6)

otimização: Equação (4.31, Capítulo 4) sujeita as restrições lineares

$\Rightarrow h_{i,\omega}^{cond}(p) = h_{i,\omega}$

repete

$p = p+1$

$h_{i,\omega}^{est}(p) = h_{i,\omega}^{cond}(p-1)$

geração das estimativas

escolha das restrições $\delta_{n,k \min}$ e $\delta_{n,k \max}$ para os $d_{i,\omega}^{cond}$ através das Equações (5.5) e (5.6)

otimização: Equação (4.31, Capítulo 4) sujeita as restrições lineares

$\Rightarrow h_{i,\omega}^{cond}(p) = h_{i,\omega}$

enquanto $|h_{i,\omega}^{cond}(p) - h_{i,\omega}^{cond}(p-1)| > \varepsilon$ e nº de iterações \leq nº máximo de iterações

$h_{i,\omega}^{cond} = h_{i,\omega}^{cond}(p)$

Uma vez determinados os valores ótimos para os $d_{i,\omega}^{cond}$, via CIPER, as fases BRT das interseções k imediatamente a jusante dos pontos k para $N_i^{N=1}$ (primeiro ponto do horizonte de predição de cada ônibus), são calculadas de forma a permitir a passagem dos ônibus pelas interseções sem necessidade de parada devido à semaforização:

$$f_{i,\omega}^{1\ cond} = d_{i,\omega}^{cond} + R_k \quad i \in I, \omega = (k, m) \in N_i^{N=1} \cap K^s \quad (5.8)$$

$$f_{i,\omega}^{2\ cond} = f_{i,\omega}^{1\ cond} + F_{BRT} \quad i \in I, \omega = (k, m) \in N_i^{N=1} \cap K^s \quad (5.9)$$

onde $f_{i,\omega}^{1\ cond}$: instante do início da fase BRT para ônibus i , ponto k , volta m e interseção k para prioridade condicional [s];

$f_{i,\omega}^{2\ cond}$: instante do final da fase BRT para ônibus i , ponto k , volta m e interseção k para prioridade condicional [s].

O modelo adotado no CIPER, por simplificação, não prevê o caso de dois ônibus do sistema BRT com fase alocada no mesmo ciclo n de uma mesma interseção k . Neste caso haveria de se implementar, dentro do procedimento de estimativas do CIPER, um sistema simples de regras para solução deste problema.

Um caso particular da prioridade condicional é a prioridade nula, onde os tempos máximos para antecipação f_{ant} e extensão f_{ext} da fase BRT são iguais a zero. Neste caso, de acordo com as Equações (5.3) e (5.4), os instantes de partida $d_{i,\omega}$ dos ônibus dos pontos k com interseção semaforizada k imediatamente a jusante, são impostos com base nas fases BRT fornecidas pelo sistema de controle de tráfego, e limitados a um valor fixo. Assim,

$$\delta_{n,kmin}^0 = \delta_{n,kmax}^0 = f_{n,k}^1 - R_k \quad n \in N^C, k \in K^s \quad (5.10)$$

onde $\delta_{n,kmin}^0$: instante mínimo de partida dos ônibus do ponto k , interseção k e ciclo n para prioridade nula [s];
 $\delta_{n,kmax}^0$: instante máximo de partida dos ônibus do ponto k , interseção k e ciclo n para prioridade nula [s].

A escolha do ciclo n relativo às restrições $\delta_{n,kmin}$ e $\delta_{n,kmax}$, associadas a determinado $d_{i,\omega}$ pertencente ao horizonte de predição N_i , com interseção semaforizada k imediatamente a jusante, também é baseada na Figura 5.4 e obedece a relação:

$$\text{se } \delta_{n-1,kmax}^0 < d_{i,\omega}^{est-h=0} \leq \delta_{n,kmax}^0 \Rightarrow n_{i,\omega}^{cond=0} = n \quad i \in I, \omega = (k, m) \in N_i \cap K^s, n \in N^C \quad (5.11)$$

onde $n_{i,\omega}^{cond=0}$: ciclo n associado a determinado $d_{i,\omega}^{est-h=0}$ para prioridade nula.

Assim, no caso prioridade nula, cada $d_{i,\omega}$ pertencente ao horizonte de predição N_i com interseção semaforizada k imediatamente a jusante, tem a restrição adicional relativa à fase BRT especificada como:

$$d_{i,\omega}^{cond=0} = \delta_{n,kmin}^0 = \delta_{n,kmax}^0 \quad i \in I, \omega = (k, m) \in N_i \cap K^s, n = n_{i,\omega}^{cond=0} \quad (5.12)$$

onde $d_{i,\omega}^{cond=0}$: instante de partida do ônibus i , ponto k e volta m para prioridade nula [s].

A Equação (5.12) especifica, para o caso prioridade nula, um valor fixo para o instante de partida $d_{i,\omega}^{cond=0}$ dos ônibus i nos pontos k com interseção semaforizada k imediatamente a jusante. Assim, estes ônibus não ficam retidos nas interseções devido à sinalização. Ou seja, estes $d_{i,\omega}^{cond=0}$ entram no procedimento de otimização via CIPER como

constantes, com os demais $d_{i,\omega}$ pertencentes ao horizonte de predição N_i como variáveis.

Como no caso prioridade nula as fases BRT já são conhecidas dentro do horizonte de predição n_N , impostas pelo sistema de controle de tráfego, estas não precisam ser calculadas. Entretanto, as fases BRT implementadas são as fases das interseções k imediatamente a jusante dos pontos k para $N_i^{N=1}$ (primeiro ponto do horizonte de predição de cada ônibus):

$$f_{i,\omega}^{1cond=0} = f_{n,k}^1 \quad i \in I, \omega = (k, m) \in N_i^{N=1} \cap K^s, n = n_{i,\omega}^{cond=0} \quad (5.13)$$

$$f_{i,\omega}^{2cond=0} = f_{i,\omega}^{1cond=0} + F_{BRT} \quad i \in I, \omega = (k, m) \in N_i^{N=1} \cap K^s, n = n_{i,\omega}^{cond=0} \quad (5.14)$$

onde $f_{i,\omega}^{1cond=0}$: instante do início da fase BRT para ônibus i , ponto k , volta m interseção k para prioridade nula [s];
 $f_{i,\omega}^{2cond=0}$: instante do final da fase BRT para ônibus i , ponto k , volta m e interseção k para prioridade nula [s].

5.3 Estudo de Caso: Aplicação do CIPER

Um exemplo da aplicação do CIPER num cenário BRT é apresentado e simulado a seguir. O exemplo considera o modelo do sistema BRT indicado na Figura 5.1, aqui constituído por 5 ônibus, 10 pontos e 2 interseções semaforizadas. São conhecidos o instante de partida $d_{i,\omega}^*$ de todos os ônibus i do(s) último(s) ponto(s) k visitado(s), o número de passageiros $l_{i,\omega}^*$ embarcados na saída do último ponto visitado, dados históricos ou esperados, dados iniciais e outros: $n_I=5$, $n_K=10$, $n_N=6$, $C_0=12$, $C_1=0,48$, $C_2=0,42$, $e_{min}=0$, $h_{max}=\infty$, $\lambda(k)=[0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0,2]$, $q(k)=[0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0,2]$, $r(k)=[60 \ 60 \ 60 \ 60 \ 60 \ 60 \ 60 \ 60 \ 60 \ 60]$, $R(k)=[30 \ - \ - \ - \ 20 \ - \ - \ -]$, $K^s=\{1,6\}$, $v_{bus}=60$ [km/h] (velocidade média dos ônibus), $F_{BRT}=10$, $f_{ant}=10$, $f_{ext}=10$, $\varepsilon=5$ e n^0 máximo de iterações=5. Os dados relativos às fases BRT são aqui representados por $f_{n,k}^1$ para o primeiro ciclo ($n=1$) de cada interseção semaforizada. Para os ciclos seguintes considera-se uma defasagem ou tempo de ciclo $C=60$ s entre as fases BRT. Tem-se: $f_{n,k}^1=[150 \ - \ - \ - \ 45 \ - \ - \ -]$,

$$D_{i,(k,1)}^* = \begin{bmatrix} - & - & - & - & - & - & - & - & 60 & 130 \\ - & - & - & - & - & - & 60 & 130 & - & - \\ - & - & - & - & 0 & 70 & - & - & - & - \\ - & - & 60 & 130 & - & - & - & - & - & - \\ 60 & 130 & - & - & - & - & - & - & - & - \end{bmatrix}$$

$$L_{i,(k,1)}^* = \begin{bmatrix} - & - & - & - & - & - & - & - & - & 20 \\ - & - & - & - & - & - & - & 20 & - & - \\ - & - & - & - & - & 20 & - & - & - & - \\ - & - & - & 20 & - & - & - & - & - & - \\ - & 20 & - & - & - & - & - & - & - & - \end{bmatrix}$$

onde $D_{i,\omega}^*$ é a matriz com os valores iniciais dos instantes $d_{i,\omega}^*$ de partida dos ônibus dos pontos e $L_{i,\omega}^*$ a matriz com o número de passageiros $l_{i,\omega}^*$ inicialmente embarcados nos ônibus (valores não iniciais indicados por “-”).

A implementação do CIPER aqui proposto, para o cenário acima descrito, leva à solução para as variáveis de controle $h_{i,\omega}$, instante de partida $d_{i,\omega}$ e início da fase BRT $f_{i,\omega}^1$ conforme indicado na Tabela 5.1. Estão indicados os valores para o caso prioridade incondicional e condicional, considerando-se para cada ônibus um percurso de 10 pontos dentro do circuito fechado BRT. Vale ressaltar que os valores indicados dizem respeito ao primeiro ponto k dentro do horizonte N_i de cada ônibus ($N_i^{N=1}$), ou seja, as ações de controle $h_{i,\omega}$ e fases BRT $f_{i,\omega}^1$ (quando houver) realmente implementadas. Pode-se observar na Tabela 5.1 que só existe fase BRT para as interseções $k=1$ e $k=6$, de acordo com o cenário proposto. O arquivo de saída do programa CIPER (MatLab) para este exemplo, com a indicação das matrizes das variáveis de controle $h_{i,\omega}$ e $d_{i,\omega}$ para as várias iterações e pontos do percurso é apresentado no Apêndice 4.

As trajetórias dos ônibus dentro do circuito fechado BRT, para o cenário proposto (distância percorrida a partir do instante zero), caso prioridade incondicional e condicional, são apresentadas nas Figuras 5.5 e 5.6 respectivamente. Nos gráficos aparece indicada a trajetória do ônibus “0” a fim de representar o intervalo ou espaçamento entre os ônibus 1 e 5. A trajetória dos ônibus para os casos de prioridade incondicional e condicional tende a se diferenciar devido às restrições adicionais relativas às fases BRT que aparecem no caso prioridade condicional. Este fato, para o cenário proposto, pode ser verificado nos valores de $d_{i,\omega}$ apresentados na Tabela 5.1 e nas trajetórias dos ônibus apresentadas nas Figuras 5.5 e 5.6, significativamente diferentes.

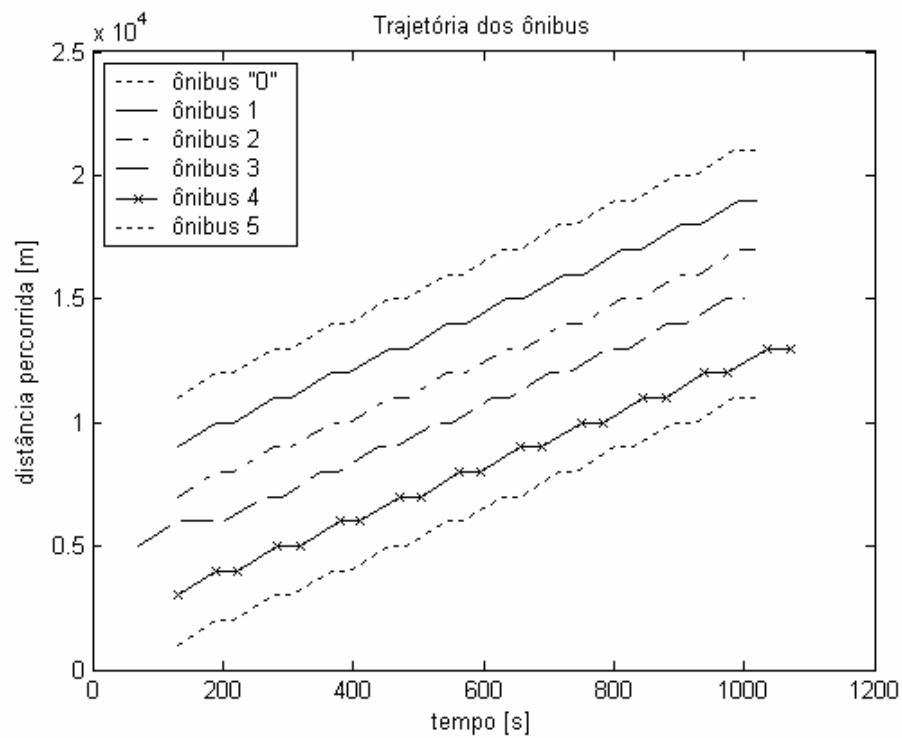


Figura 5.5. Trajetória dos ônibus do sistema BRT com controle integrado de prioridade e retenção para um percurso de 10 pontos (prioridade incondicional - CIPER)

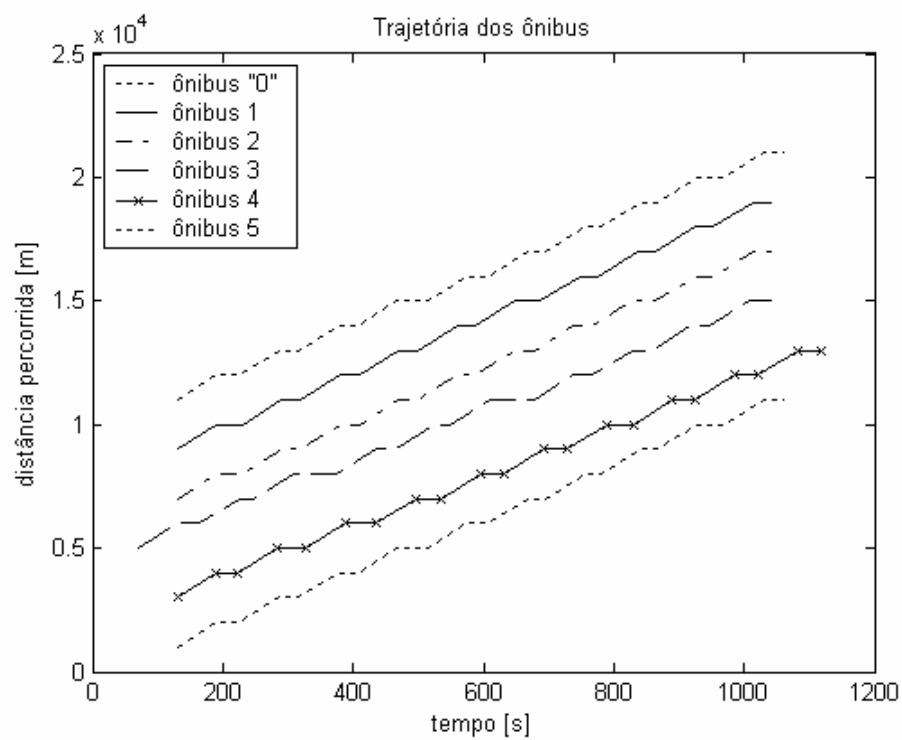


Figura 5.6. Trajetória dos ônibus do sistema BRT com controle integrado de prioridade e retenção para um percurso de 10 pontos (prioridade condicional - CIPER)

Ou seja, as restrições adicionais relativas às fases BRT, para o caso de prioridade condicional, tendem a alterar os instantes de partida dos ônibus dos pontos e o início das fases BRT quando comparados com o caso de prioridade incondicional.

Tabela 5.1. Valores das variáveis de controle $h_{i,\omega}$, instante de partida $d_{i,\omega}$ e início da fase BRT $f_{i,\omega}^1$ para prioridade incondicional e condicional (via CIPER)

Ônibus i	Ponto k (volta)	Prioridade incondicional			Prioridade condicional		
		$h_{i,\omega}$ [s]	$d_{i,\omega}$ [s]	$f_{i,\omega}^{1inc}$ [s]	$h_{i,\omega}^{cond}$ [s]	$d_{i,\omega}^{cond}$ [s]	$f_{i,\omega}^{1cond}$ [s]
1	1 (2)	0	217,1	247,1	12,9	230,0	260,0
	2 (2)	0	306,0	-	0	320,3	-
	3 (2)	0	395,1	-	0	409,8	-
	4 (2)	0	484,2	-	0	499,3	-
	5 (2)	0	573,3	-	0	588,8	-
	6 (2)	0	662,7	682,7	11,1	687,3	707,3
	7 (2)	0	752,3	-	0	775,4	-
	8 (2)	0	842,2	-	0	863,6	-
	9 (2)	0	932,5	-	1,7	953,7	-
	10(2)	0	1023,0	-	0	1042,6	-
2	9 (1)	0	217,1	-	13,3	230,4	-
	10 (1)	0	306,0	-	0	320,7	-
	1 (2)	0	395,1	425,1	0	410,0	440,0
	2 (2)	0	484,2	-	0	499,2	-
	3 (2)	0	573,3	-	0	588,3	-
	4(2)	0	662,4	-	0,4	677,8	-
	5(2)	0	751,5	-	0	766,9	-
	6(2)	0	840,6	860,6	9,0	864,0	884,0
	7(2)	0	929,6	-	0,3	953,4	-
	8(2)	0	1018,5	-	0	1042,5	-
3	7 (1)	52,5	203,3	-	14,1	164,8	-
	8 (1)	0	290,7	-	0	248,2	-
	9 (1)	0	378,1	-	45,7	375,4	-
	10(1)	0	465,5	-	3,7	464,6	-
	1 (2)	0	552,6	582,6	0	550,0	580,0
	2(2)	0,6	640,1	-	43,2	678,2	-
	3(2)	3,9	730,8	-	0	767,4	-
	4(2)	3,8	821,4	-	0,8	857,3	-
	5(2)	3,9	912,4	-	0	946,6	-
	6(2)	3,9	1003,6	1023,6	8,7	1043,7	1063,7
4	5 (1)	0	223,5	-	0	223,5	-
	6 (1)	0	319,4	339,4	8,1	327,5	347,5
	7 (1)	0	411,4	-	11,6	436,1	-
	8 (1)	0	503,8	-	0	535,7	-
	9 (1)	0	596,8	-	0	632,3	-
	10(1)	0	690,4	-	0	729,8	-
	1(2)	0	784,7	814,7	1,5	830,0	860,0
	2(2)	0	879,7	-	0	925,8	-
	3(2)	0	975,2	-	0	1022,2	-

	4(2)	0	1071,2	-	0	1119,4	-
5	3 (1)	0	217,1	-	9,6	226,7	-
	4 (1)	0	306,0	-	0,7	317,3	-
	5 (1)	0	394,4	-	0	406,9	-
	6 (1)	0	482,0	502,0	20,0	515,0	535,0
	7 (1)	0	569,1	-	4,7	607,7	-
	8(1)	0	655,7	-	0	695,1	-
	9(1)	0	741,6	-	0	781,4	-
	10(1)	4,0	830,7	-	0	866,5	-
	1(2)	8,5	923,7	953,7	20,0	970,0	1000,0
	2(2)	10,6	1018,6	-	8,2	1062,5	-
Custo total		297905,1 [s]			335480,8 [s]		

Nas Figuras 5.5 e 5.6, as linhas horizontais das trajetórias dos ônibus representam o tempo de parada do ônibus nos pontos, que pode ou não incluir uma ação de controle de retenção adicional. Conforme verificado, os ônibus somente param nos pontos, sem paradas adicionais devido à sinalização das interseções. Pode-se verificar também que o espaçamento entre os ônibus, não uniforme de acordo com os dados iniciais, é corrigido devido à ação de controle de retenção. Esta correção dos espaçamentos ocorre tanto no caso prioridade incondicional como no caso prioridade condicional, com diferenças de magnitude e ou ponto de atuação da ação de controle de retenção.

O custo ou atraso total dos usuários do sistema BRT para os casos prioridade incondicional e condicional, considerando-se o percurso de 10 pontos, também aparece indicado na Tabela 5.1. Este custo é calculado a partir da Equação (4.15) do modelo ampliado do sistema BRT apresentado no Capítulo 4, considerando-se os valores $h_{i,\omega}$ (e outras variáveis do sistema BRT) ótimos, calculados via CIPER, para o horizonte $N_i^{N=1}$ de cada ônibus. Ou seja, o ponto associado à ação de controle e fase BRT (se houver) realmente implementados. Conforme esperado, o custo do sistema BRT é menor no caso prioridade incondicional. Importante salientar que o custo engloba somente o sistema BRT, não considerando o restante do tráfego. No caso de prioridade incondicional espera-se um aumento no custo do tráfego convencional em relação ao caso prioridade condicional, visto que as fases BRT são impostas, sem considerar as fases BRT fornecidas pelo sistema de controle de tráfego. Esta imposição das fases BRT, sem levar em conta as especificações fornecidas pelo sistema de controle de tráfego, causam um impacto adicional sobre os veículos nas vias de tráfego convencional, na forma de perda da coordenação semaforica e conseqüente aumento dos atrasos (Engelbrecht, 1997; Abu-Lebdeh e Benekohal, 1997; Skabardonis *et al.*, 1998b; Shoup e Bullock, 1999; Kovvali, 2001; Gartner e Stamatiadis,

2002). Já no caso de prioridade condicional, os instantes de partida $d_{i,\omega}^{cond}$ dos ônibus dos pontos e portanto, as ações de controle de retenção $h_{i,\omega}$, são calculados (otimizados via CIPER) levando-se em conta as restrições relativas às fases BRT impostas pelo sistema de controle de tráfego. Portanto, menor o impacto da fase BRT sobre o tráfego convencional.

5.4 Comentários sobre o CIPER

A aplicação do CIPER (Controle Integrado de Prioridade e Retenção), no controle do sistema BRT mais interseções semaforizadas, do exemplo aqui apresentado, e outros exemplos testados, apresentou resultados que mostram sua eficácia. A ação de controle de retenção (nível global), calculada via CIPER sujeita às restrições adicionais das fases BRT (nível local), permitiu, além da correção do espaçamento entre os ônibus do sistema BRT, uma trajetória dos ônibus sem paradas devido à sinalização das interseções. O tempo para o cálculo das ações de controle ótimas e das fases BRT é da ordem de poucos segundos, compatível com aplicações em tempo real.

Dependendo do cenário utilizado, dados iniciais e parâmetros do sistema BRT, pode ocorrer uma situação de não factibilidade da solução. Esta não factibilidade geralmente está associada ao encontro, dentro do horizonte de predição, entre dois ônibus. Neste caso, uma redução do horizonte de pontos de predição n_N elimina o problema.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Neste trabalho são apresentados três modelos ou estratégias de controle da operação de sistemas de transporte público por ônibus, o que inclui sistemas do tipo BRT. A estratégia apresentada no capítulo 3, denominada CISPOP (Controle Integrado da Semaforização e Partida do ônibus do Ponto), aplica-se à interseções isoladas, e permite uma operação mais eficiente, em termos de custos, para o sistema de tráfego da interseção, mais especificamente, para o sistema de transporte público. Além do controle adaptativo da temporização semafórica da interseção, com possibilidade de prioridade para os ônibus, o principal diferencial do CISPOP está relacionado com a operação partida controlada PC do ônibus do ponto próximo e a montante da interseção. Na operação PC o ônibus, em sua trajetória até a interseção, não para na fila de veículos formada na interseção devido à sinalização semafórica.

A operação partida controlada PC mostra-se uma opção interessante, em termos de custo, para casos onde a requisição de partida do ônibus do ponto t_r acontece mais próxima do final do vermelho nominal da via 1 (via com a presença do ônibus) e, para um fluxo de veículos baixo na via 1 em relação à via 2. Um caso particular seria um sistema BRT com faixa segregada para os ônibus num cruzamento ou interseção com uma via de tráfego convencional.

Apesar do modelo utilizado apresentar valores fixos para o tempo de ciclo, exceção para o modo III, a estratégia apresentada pode ser utilizada em combinação com outros tipos de estratégias do tipo controle atuado (ciclo variável) e estratégias adaptativas a nível de rede. A implementação prática pode ser feita por uma série de tecnologias de comunicação de baixo custo, como por exemplo, ZigBee (ZigBee, 2007) para detecção dos ônibus e detectores convencionais de *loop* para estimativa da fila de veículos (Gallego *et al.*, 1997).

As simplificações utilizadas, principalmente em relação ao modelo de chegada de veículos, representado por uma taxa constante, permitem um tratamento analítico para o problema apresentado. Uma estimativa mais precisa do fluxo médio de veículos por ciclo pode ser obtida via detecção dos veículos a montante da interseção. Entretanto, a

representação do fluxo de veículos por uma taxa constante não é necessariamente verdadeira para uma interseção real. Uma representação mais realista do fluxo de veículos e do processo de formação e dissipação da fila de veículos na interseção deveria contemplar uma análise numérica. Todavia, a análise aqui apresentada ilustra a potencialidade da estratégia proposta, tornando a metodologia útil para uma implementação via solução numérica com a distribuição da chegada de veículos estimada em tempo real.

A estratégia apresentada no Capítulo 4, denominada MSAM (Método de Solução por Aproximação de Modelo), é utilizada para o controle, via retenção dos ônibus nos pontos, do espaçamento entre os ônibus dos sistema de transporte público, ou caso particular, para sistemas BRT. O MSAM apresenta uma série de características e vantagens em relação a outros trabalhos anteriores, sendo que o modelo ampliado utilizado (função custo e restrições) apresenta como principais diferenciais: inclusão do atraso dos passageiros embarcados nos ônibus na função custo, inclusão de um índice e operadores para representação da volta dos ônibus dentro do circuito fechado BRT, possibilidade (dentro da função custo) de retenção dos ônibus em qualquer ponto do horizonte de predição, utilização de variáveis contínuas para maior eficiência no processo de otimização, utilização de restrições de ultrapassagem entre os ônibus, retenção máxima permitida, etc. Alguns trabalhos, por simplificação, não consideram o atraso dos passageiros embarcados na função custo, o que garante a convexidade e ou não consideram a restrição não linear associada à escolha entre o processo de embarque ou desembarque de passageiros nos ônibus. Entretanto, entende-se que para uma representação realista do sistema BRT, o atraso dos passageiros embarcados, assim como a possibilidade de escolha entre o processo mais lento, embarque ou desembarque de passageiros, não podem ser desprezados. Para um controle de retenção eficiente, o horizonte de predição ou impacto da ação de controle deve poder abranger pontos além da volta atual dos ônibus dentro do circuito fechado BRT, o que necessariamente envolve o uso da representação da volta. Esta representação do índice relativo à volta do ônibus e dos operadores associados não aparece em trabalhos anteriores.

Para uma solução eficiente do problema de otimização, dada a complexidade do modelo ampliado utilizado, com função custo não convexa e restrições não lineares, o MSAM faz uso de uma estimativa inicial para as variáveis do sistema BRT, antes do processo de otimização. Estas estimativas permitem reescrever o modelo ampliado através

de uma função custo convexa e restrições lineares, ou seja, um problema de programação quadrática, facilmente resolvido em tempo real. Para minimizar o desvio encontrado nos valores da ação de controle calculados via MSAM em relação aos valores ótimos globais do modelo ampliado, utiliza-se várias iterações para o procedimento de estimativas e otimização, até a convergência da variável de controle. Para o exemplo apresentado, e outros exemplos testados, a solução obtida para a variável de controle via MSAM apresentou resultados muito próximos aos obtidos para o modelo ampliado via simulação, com uma diferença insignificante face à dinâmica do sistema BRT. A convergência da variável de controle ocorreu em poucas iterações, com um tempo de processamento compatível com uma aplicação de controle de retenção em tempo real.

A utilização do MSAM aqui apresentado num cenário BRT maior e ou real é perfeitamente viável e possível. Esperam-se para estes casos resultados similares ou tão positivos quanto os obtidos nos exemplos aqui apresentados. A utilização do MSAM num sistema de transporte público por ônibus convencional, não BRT, exige somente, dadas as particularidades e características de cada cenário, as estimativas atualizadas do tempo de viagem dos ônibus entre pontos.

A estratégia apresentada no Capítulo 5, denominada CIPER (Controle Integrado de Prioridade e Retenção), é uma extensão do MSAM apresentado no Capítulo 4, com o acréscimo da possibilidade de prioridade para os ônibus do sistema BRT nas interseções semaforizadas. O modelo utilizado considera um sistema BRT, com faixas segregadas para os ônibus, com interseções semaforizadas entre as faixas (ou vias que contém as faixas) BRT e as vias de tráfego convencional. A integração trabalha em dois níveis: um nível local, referente à temporização semafórica ou alocação das fases BRT nas interseções, com possibilidade de prioridade para os ônibus, e um nível global, referente ao controle do espaçamento entre os ônibus via retenção nos pontos. A integração é feita através da incorporação de restrições adicionais relativas às fases BRT, dadas pelos planos semafóricos das interseções (nível local), no cálculo dos instantes de partida dos ônibus dos pontos (nível global).

O modelo utilizado no sistema de controle integrado e o procedimento adotado para solução do problema de otimização permitem a simplificação do problema, com a escolha das restrições adicionais relativas às fases BRT, no caso prioridade condicional, via processo de estimativas. Portanto, sem necessidade de utilização de variáveis inteiras, binárias, técnicas de programação inteira mista, etc. O modelo utilizado no CIPER, uma

extensão do MSAM mais o acréscimo das restrições relativas às fases BRT, apresenta função custo convexa e restrições lineares, o que permite a utilização de algoritmos simples e de baixo custo para solução do problema (programação quadrática) em tempo real.

A aplicação do CIPER num cenário típico BRT, via simulação, apresentou resultados que mostraram sua eficácia para o exemplo proposto. A ação de controle de retenção (nível global), calculada via CIPER sujeita às restrições adicionais das fases BRT (nível local), permitiu, além da correção do espaçamento entre os ônibus do sistema BRT, uma trajetória sem paradas devido à sinalização semafórica das interseções. O tempo para o cálculo das ações de controle ótimas e das fases BRT é da ordem de poucos segundos, compatível com aplicações em tempo real. A utilização do CIPER num cenário maior e ou real é perfeitamente viável e possível. Esperam-se para estes casos resultados similares ou tão positivos quanto os obtidos no exemplo aqui apresentado.

O CIPER e o MSAM aplicam-se a linhas de alta frequência, isto é, com pequenos espaçamentos entre ônibus. Esse tipo de operação não se baseia em planos horários, o que permite usar a retenção dos ônibus nos pontos como forma de otimizar o desempenho global do sistema BRT.

Sugere-se para trabalhos futuros a inclusão, no modelo ampliado do sistema BRT apresentado no capítulo 4, da capacidade limitada dos ônibus. Esta limitação seria representada por restrições adicionais relativas ao número máximo de passageiros embarcados nos ônibus e uma parcela adicional na função custo para representar o atraso dos passageiros que não conseguiram embarcar.

No caso do controle integrado de prioridade e retenção apresentado no Capítulo 5, a escolha das restrições associadas às fases BRT, relativas a determinados instantes de partida dos ônibus dos pontos, pode ser implementada via utilização de variáveis binárias. Sugere-se uma comparação deste problema, de programação inteira mista não linear, com o CIPER, em termos de tempo de processamento e eficiência da solução.

Uma aplicação do MSAM e CIPER via microsimulação seria interessante para uma análise da influência do comportamento eminentemente estocástico dos parâmetros do sistema BRT (tempo de viagem dos ônibus entre pontos, taxa de chegada de passageiros nos pontos e fração de passageiros que desembarcam dos ônibus em cada ponto). O modelo aqui utilizado para representação do sistema de transporte público, mais especificamente o sistema BRT, pressupõe que estes parâmetros são conhecidos e

permanecem constantes dentro do horizonte de predição (rolante) considerado, podendo ser atualizados para o próximo intervalo de controle.

Já a aplicação do CISPOP, MSAM e CIPER num cenário real seria bastante desejável e enriquecedor. Entretanto, dada a complexidade de um cenário real e das dificuldades práticas associadas, esta implantação foi descartada neste trabalho.

APÊNDICE 1

Este apêndice apresenta as principais informações do arquivo de saída do programa MatLab, relativo aos resultados obtidos via MSAM, para a variável de controle de retenção $h_{i,\omega}$, conforme apresentado na Tabela 4.1 do Capítulo 4. O exemplo considera cinco estimativas (e otimização), um horizonte de predição de dez pontos ($n_N=10$) e um percurso de um ponto para cada ônibus (ou uma iteração) dentro do circuito fechado BRT.

 % ----- Dados de Entrada -----

num_iter =1 % nº de iterações

num_est_max =5 % nº máximo de estimativas

tolerancia_maxima =0 % tolerância máxima para convergência da variável de controle

ni =5 % nº de ônibus

nk =10 % nº de pontos

nN=10 % nº de pontos do horizonte de predição

% constantes de embarque e desembarque de passageiros nos pontos [s]

C0=12

C1=0.48

C2=0.42

emin=0 % espaçamento mínimo entre ônibus

h_max =inf % retenção máxima dos ônibus nos pontos

```

vbus=60          % velocidade dos ônibus no circuito BRT [km/h]

lbd =[0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2]    % taxa de chegada de passageiros aos pontos k
                                                    [passageiros/s]

r =[60  60  60  60  60  60  60  60]                % tempo de viagem dos ônibus entre pontos [s]

q=[0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2]        % fração de passageiros que desembarcam nos
                                                    pontos

D_in(:, :, 1)=[-2 -2 -2 -2 -2 -2 -2 -2 60 130;      % valores iniciais di,k* [s]
               -2 -2 -2 -2 -2 -2 60 130 -2 -2;      valores não iniciais = -2
               -2 -2 -2 -2 0 70 -2 -2 -2 -2;
               -2 -2 60 130 -2 -2 -2 -2 -2 -2;
               60 130 -2 -2 -2 -2 -2 -2 -2 -2]

L_in(:, :, 1)=[-2 -2 -2 -2 -2 -2 -2 -2 0 20;        % valores iniciais li,k*
               -2 -2 -2 -2 -2 -2 0 20 -2 -2;        valores não iniciais = -2
               -2 -2 -2 -2 0 20 -2 -2 -2 -2;
               -2 -2 0 20 -2 -2 -2 -2 -2 -2;
               0 20 -2 -2 -2 -2 -2 -2 -2 -2]

% ----- Dados de Saída MSAM -----

Iter =1  % nº da iteração

est =1  % nº da estimativa

Optimization terminated successfully: Magnitude of directional derivative in search direction less
than 2*options.TolFun and maximum constraint violation is less than options.TolCon

% matriz H(i,k,m) ação de controle de retenção hi,w, com w=(k,m)
H_est(:, :, 1) =
Columns 1 through 5
    0    0    0    0    0
    0    0    0    0    0

```

```

0    0    0    0    0
0    0    0    0 -0.0000
0    0  3.0072 -0.0000 -0.0000

```

Columns 6 through 10

```

0    0    0    0    0
0    0    0 -0.0000  0.0000
0  89.4726 -0.0000 -0.0000 -0.0000
-0.0000  0.0000  0.0000 -0.0000 -0.0000
0.0000  0.0000  0.0000 -0.0000 -0.0000

```

H_est(:,2) =

1.0e-018 *

Columns 1 through 5

```

0.0323 -0.0369  0.0573 -0.0034 -0.0182
-0.0096  0.2422 -0.0421  0.1261 -0.1122
0.0326 -0.1376  0.1292  0.0098  0.0170
0.0101  0.1887 -0.3038 -0.0450    0
0.0929  0.1196    0    0    0

```

Columns 6 through 10

```

0.1944  0.0563  0.0736  0.1931 -0.2260
0.0371 -0.1319  0.3495    0    0
-0.0800    0    0    0    0
0    0    0    0    0
0    0    0    0    0

```

est =2 % nº da estimativa

Optimization terminated successfully: Magnitude of directional derivative in search direction less than 2*options.TolFun and maximum constraint violation is less than options.TolCon

H_est(:,1) =

Columns 1 through 5

```

0    0    0    0    0
0    0    0    0    0
0    0    0    0    0
0    0    0    0  0.0000

```

```
0    0  1.0494  0.0000 -0.0000
```

Columns 6 through 10

```
0    0    0    0    0
0    0    0  0.0000  0.0000
0  65.6570 -0.0000  0.0000  0.0000
-0.0000  0.0000  0.0000  0.0000 -0.0000
0.0000 -0.0000  0.0000  0.0000  0.0000
```

H_est(:,2) =

1.0e-017 *

Columns 1 through 5

```
-0.0436  0.0160 -0.0193  0.0363  0.0609
-0.0229  0.0013 -0.0186 -0.0032  0.0477
-0.0743 -0.1062  0.0446 -0.0069 -0.0315
-0.0227  0.0348  0.0365 -0.0076    0
0.0077 -0.0352    0    0    0
```

Columns 6 through 10

```
-0.0495  0.0179  0.0026 -0.0895 -0.0180
0.0270 -0.0230  0.0158    0    0
0.0544    0    0    0    0
0    0    0    0    0
0    0    0    0    0
```

est =3 % nº da estimativa

Optimization terminated successfully: Magnitude of directional derivative in search direction less than 2*options.TolFun and maximum constraint violation is less than options.TolCon

H_est(:,1) =

Columns 1 through 5

```
0    0    0    0    0
0    0    0    0    0
0    0    0    0    0
0    0    0    0  0.0000
0    0  1.1100 -0.0000  0.0000
```

Columns 6 through 10


```

0      0      0      0      0
0      0      0 -0.0000  0.0000
0 69.7936  0.0000  0.0000  0.0000
0.0000  0.0000 -0.0000  0.0000 -0.0000
0.0000  0.0000 -0.0000  0.0000  0.0000

```

H_est(:,2) =

1.0e-017 *

Columns 1 through 5

```

0.0012  0.0024 -0.0067  0.0114 -0.0035
-0.0372  0.0734  0.0411  0.0184 -0.0066
0.0099  0.0127 -0.1143  0.1079  0.0390
-0.0170 -0.1031  0.0712 -0.0257    0
-0.0370 -0.0087    0    0    0

```

Columns 6 through 10

```

-0.0609 -0.0270 -0.0489 -0.0693  0.0827
-0.0118  0.0422  0.0177    0    0
-0.0181    0    0    0    0
    0    0    0    0    0
    0    0    0    0    0

```

est =4 % nº da estimativa

Optimization terminated successfully: Magnitude of directional derivative in search direction less than 2*options.TolFun and maximum constraint violation is less than options.TolCon

H_est(:,1) =

Columns 1 through 5

```

0      0      0      0      0
0      0      0      0      0
0      0      0      0      0
0      0      0      0 -0.0000
0      0  1.1479 -0.0000 -0.0000

```

Columns 6 through 10

```

0      0      0      0      0
0      0      0  0.0000  0.0000

```

```

    0 69.0768 -0.0000 0.0000 -0.0000
-0.0000 0.0000 -0.0000 0.0000 0.0000
-0.0000 -0.0000 0.0000 -0.0000 -0.0000

```

H_est(:,2) =

1.0e-019 *

Columns 1 through 5

```

    0.0212 -0.0779 0.0876 -0.0322 0.1146
-0.0153 0.0401 0.0560 0.0913 0.0361
-0.0078 -0.0317 0.1252 0.2020 0.3024
-0.0006 0.0091 -0.1198 -0.0628 0
    0.1517 -0.1476 0 0 0

```

Columns 6 through 10

```

    0.3200 0.4678 -0.0499 -0.4376 0.1550
-0.0140 0.0027 0.2112 0 0
    0.1923 0 0 0 0
    0 0 0 0 0
    0 0 0 0 0

```

est =5 % nº da estimativa

Optimization terminated successfully: Magnitude of directional derivative in search direction less than 2*options.TolFun and maximum constraint violation is less than options.TolCon

H_est(:,1) =

Columns 1 through 5

```

    0 0 0 0 0
    0 0 0 0 0
    0 0 0 0 0
    0 0 0 0 0.0000
    0 0 1.1344 -0.0000 0.0000

```

Columns 6 through 10

```

    0 0 0 0 0
    0 0 0 -0.0000 0.0000
    0 69.2045 0.0000 0.0000 0.0000
    0.0000 -0.0000 -0.0000 -0.0000 -0.0000
-0.0000 -0.0000 0.0000 -0.0000 -0.0000

```

H_est(:, :, 2) =

1.0e-017 *

Columns 1 through 5

0.0243	-0.0298	0.0418	0.1104	0.1270
-0.0595	0.1036	0.2862	-0.0898	-0.0567
0.0382	0.1445	-0.7084	0.0973	-0.5332
0.0073	-0.2873	0.4721	0.1713	0
-0.5056	0.1502	0	0	0

Columns 6 through 10

0.2975	0.2087	-0.2938	-0.8340	0.4966
0.0501	0.0086	-0.4526	0	0
-0.1134	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

APÊNDICE 2

Este apêndice apresenta primeiramente, o programa na linguagem AMPL, relativo ao modelo ampliado do sistema BRT (Capítulo 4) com a restrição não linear da Equação (4.21) substituída pelo conjunto de inequações lineares da Equação (4.28). Portanto, um modelo com função custo não convexa e restrições lineares, ou seja, um problema de programação não linear inteira mista. Em seguida, são apresentadas as principais informações do arquivo de saída obtido via *solver* FILMINT/NEOS para o primeiro exemplo do Capítulo 4. Aparecem listados o custo ou atraso total do sistema BRT e as matrizes de saída relativas às variáveis controle de retenção $h_{i,\omega}$ e instante de partida $d_{i,\omega}$, conforme Tabelas 4.1 e 4.2 do Capítulo 4. O exemplo considera um horizonte de predição de dez pontos ($n_N=10$) e um percurso de um ponto para cada ônibus dentro do circuito fechado BRT.

```
-----
param nI > 0 integer; # número de ônibus dos sistema BRT
param T > 0 integer; # n° pontos do horizonte de predição
param nS > 0 integer; # número de pontos
param eps > 0; # valor da tolerância máxima

set I := 1..nI; # conjunto de ônibus

param ml > 0 integer; # índice da primeira volta do horizonte
param mr > 0 integer; # índice da última volta do horizonte

set M := ml..mr;
set S := 1..nS;

param lb {S} >= 0; # taxa chegada passageiros nos pontos
param r {S} >= 0; # tempo viagem dos ônibus entre pontos
param q {S} >= 0; # fração de passageiros que desembarcam nos pontos

set Ki within (I cross M cross S);
set Si within (I cross M cross S); # condições iniciais

param li {(i,m,k) in Si} >= 0; # número inicial passageiros embarcados
param di {(i,m,k) in Si} >= 0; # instante inicial partida ônibus pontos

param c0;
param c1;
param c2;
param c3;
param hmax;
```

```

#-----
var a {(i,m,k) in Ki} >= 0;
var d {(i,m,k) in Ki union Si} >= 0;
var s {(i,m,k) in Ki} >= 0;
var h {(i,m,k) in Ki} >= 0;
var l {(i,m,k) in Ki union Si} >= 0;
var y {(i,m,k) in Ki} binary;

#-----
minimize delay:
    sum{(i,m,k) in Ki : i>1} lb[k]*(d[i,m,k]- d[i-1,m,k])^2/2
    + sum{(i,m,k) in Ki : i==1} lb[k]*(d[i,m,k]- d[nI,m-1,k])^2/2
    + sum{(i,m,k) in Ki : k>1} (s[i,m,k] + h[i,m,k])*l[i,m,k-1]*(1-
q[k])
    + sum{(i,m,k) in Ki : k==1} (s[i,m,k] + h[i,m,k])*l[i,m-1,nS]*(1-
q[k]);

#-----
subject to cst_arrival_A{(i,m,k) in Ki : k>1}:
    a[i,m,k] = d[i,m,k-1] + r[k];
subject to cst_arrival_B{(i,m,k) in Ki : k==1}:
    a[i,m,k] = d[i,m-1,nS] + r[k];

#-----
subject to cst_departure_init{(i,m,k) in Si}:
    d[i,m,k] = di[i,m,k];

subject to cst_passangers_init{(i,m,k) in Si}:
    l[i,m,k] = li[i,m,k];

#-----
subject to cst_dwelltime_board_A{(i,m,k) in Ki : i>1}:
    s[i,m,k] >= (c0 + c1*lb[k]*(a[i,m,k] - d[i-1,m,k]))/(1 - c1*lb[k])
-eps;
subject to cst_dwelltime_board_B{(i,m,k) in Ki : i==1}:
    s[i,m,k] >= (c0 + c1*lb[k]*(a[i,m,k] - d[nI,m-1,k]))/(1 - c1*lb[k])
-eps;

subject to cst_dwelltime_alight_A{(i,m,k) in Ki : k>1}:
    s[i,m,k] >= c0 + c2*q[k]*l[i,m,k-1] -eps;
subject to cst_dwelltime_alight_B{(i,m,k) in Ki : k==1}:
    s[i,m,k] >= c0 + c2*q[k]*l[i,m-1,nS] -eps;

#-----
subject to cst_dwelltime_board_A_Upper{(i,m,k) in Ki : i>1}:
    s[i,m,k] <= (c0 + c1*lb[k]*(a[i,m,k] - d[i-1,m,k]))/(1 - c1*lb[k])
    + c3*(1-y[i,m,k]) +eps;
subject to cst_dwelltime_board_B_Upper{(i,m,k) in Ki : i==1}:
    s[i,m,k] <= (c0 + c1*lb[k]*(a[i,m,k] - d[nI,m-1,k]))/(1 - c1*lb[k])
    + c3*(1-y[i,m,k]) +eps;

subject to cst_dwelltime_alight_A_Upper{(i,m,k) in Ki : k>1}:
    s[i,m,k] <= c0 + c2*q[k]*l[i,m,k-1] + c3*y[i,m,k] +eps;
subject to cst_dwelltime_alight_B_Upper{(i,m,k) in Ki : k==1}:
    s[i,m,k] <= c0 + c2*q[k]*l[i,m-1,nS] + c3*y[i,m,k] +eps;

#-----
subject to cst_hold{(i,m,k) in Ki}:
    d[i,m,k] = a[i,m,k] + s[i,m,k] + h[i,m,k];

```

```
#-----
subject to cst_max_hold{(i,m,k) in Ki}:
    h[i,m,k] <= hmax;

#-----
subject to cst_passangers_onboard_A{(i,m,k) in Ki : i>1 and k>1}:
    l[i,m,k] = lb[k]*(d[i,m,k] - d[i-1,m,k]) + (1-q[k])*l[i,m,k-1];

subject to cst_passangers_onboard_B{(i,m,k) in Ki : i==1 and k>1}:
    l[i,m,k] = lb[k]*(d[i,m,k] - d[nI,m-1,k]) + (1-q[k])*l[i,m,k-1];

subject to cst_passangers_onboard_C{(i,m,k) in Ki : i>1 and k==1}:
    l[i,m,k] = lb[k]*(d[i,m,k] - d[i-1,m,k]) + (1-q[k])*l[i,m-1,nS];

subject to cst_passangers_onboard_D{(i,m,k) in Ki : i==1 and k==1}:
    l[i,m,k] = lb[k]*(d[i,m,k] - d[nI,m-1,k]) + (1-q[k])*l[i,m-1,nS];
#-----
#--- arquivo de saída ---
```

FilMINT (AMPL) v0.0000000001: Optimal solution found

delay = 289410

d[*,1,*] (tr)

:	1	2	3	4	5	:=
1	.	.	.	.	60	
2	.	.	.	.	130	
3	.	.	.	60	217.179	
4	.	.	.	130	306.083	
5	.	.	0	223.451	394.505	
6	.	.	70	319.393	482.127	
7	.	60	218.334	409.771	569.457	
8	.	130	307.36	500.293	656.448	
9	60	217.08	396.594	590.951	743.049	
10	130	305.973	485.863	681.757	829.204	

[*,2,*] (tr)

:	1	2	3	4	5	:=
1	217.08	395.059	575.152	772.723	914.848	
2	305.973	484.166	664.46	863.866	999.908	
3	395.048	573.275	753.79	955.202	.	
4	484.142	662.387	843.142	1046.75	.	
5	573.307	751.493	932.521	.	.	
6	662.636	840.575	1021.93	.	.	

```

7  752.177  929.608  .  .  .
8  841.989  1018.56  .  .  .
9  932.142  .  .  .  .
10 1022.72  .  .  .  .
;

```

h [*,1,*] (tr)

```

:  2  3  4  5  :=
3  .  .  .  0.0997558
4  .  .  .  0
5  .  .  0  0
6  .  .  0  0
7  .  67.6258  0  0
8  .  0  0  0
9  0  0  0  0
10 0  0  0  0

```

[*,2,*] (tr)

```

:  1  2  3  4  5  :=
1  0  0  0  0  0
2  0  0  0  0  0
3  0  0  0  0  .
4  0  0  0  0  .
5  0  0  0  .  .
6  0  0  0  .  .
7  0  0  .  .  .
8  0  0  .  .  .
9  0  .  .  .  .
10 0  .  .  .  .
;

```

APÊNDICE 3

Este apêndice apresenta as principais informações do arquivo de saída do programa MatLab, relativo aos resultados obtidos via MSAM, para a variável de controle de retenção $h_{i,\omega}$, conforme apresentado nas matrizes $H_{i,(k,m)}$ e Tabela 4.4 do Capítulo 4. O exemplo considera um máximo de cinco estimativas, tolerância máxima de 1 s e um horizonte de predição de dez pontos ($n_N=10$), com um percurso de dez pontos para cada ônibus (ou dez iterações) dentro do circuito fechado BRT. Por simplificação e por restrições de espaço, somente são apresentados os dados relativos à última estimativa (estimativa com convergência da variável de controle ou n^o máximo de estimativas), para o caso com controle de retenção.

% ----- Dados de Entrada -----

num_iter =10 % n^o de iterações

num_est_max =5 % n^o máximo de estimativas

tolerancia_maxima =1 % tolerância máxima para convergência da variável de controle

ni =5 % n^o de ônibus

nk =10 % n^o de pontos

nN=10 % n^o de pontos do horizonte de predição

% constantes de embarque e desembarque de passageiros nos pontos [s]

C0=12

C1=0.48

C2=0.42


```

emin=0          % espaçamento mínimo entre ônibus

h_max =inf       % retenção máxima dos ônibus nos pontos

vbus=60          % velocidade dos ônibus no circuito BRT [km/h]

lbd =[0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2] % taxa de chegada de passageiros aos pontos k
                                         [passageiros/s]

r =[60  60  60  60  60  60  60  60] % tempo de viagem dos ônibus entre pontos [s]

q =[0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2] % fração de passageiros que desembarcam nos
                                         pontos

D_in(:,1)=[-2 -2 -2 -2 -2 -2 -2 -2 60 130; % valores iniciais di,k* [s]
           -2 -2 -2 -2 -2 -2 60 130 -2 -2; % valores não iniciais = -2
           -2 -2 -2 -2 0 70 -2 -2 -2 -2;
           -2 -2 60 130 -2 -2 -2 -2 -2 -2;
           60 130 -2 -2 -2 -2 -2 -2 -2 -2]

L_in(:,1)=[-2 -2 -2 -2 -2 -2 -2 -2 0 20; % valores iniciais li,k*
           -2 -2 -2 -2 -2 -2 0 20 -2 -2; % valores não iniciais = -2
           -2 -2 -2 -2 0 20 -2 -2 -2 -2;
           -2 -2 0 20 -2 -2 -2 -2 -2 -2;
           0 20 -2 -2 -2 -2 -2 -2 -2 -2]

% ----- Dados de Saída MSAM -----

Iter =1 % nº da iteração

est =4 % nº da estimativa (convergência na 4ª estimativa)

Optimization terminated successfully: Magnitude of directional derivative in search direction less
than 2*options.TolFun and maximum constraint violation is less than options.TolCon

H_est(:,1) =

```

Columns 1 through 5

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	-0.0000
0	0	1.1479	-0.0000	-0.0000

Columns 6 through 10

0	0	0	0	0
0	0	0	0.0000	0.0000
0	69.0768	-0.0000	0.0000	-0.0000
-0.0000	0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000
-0.0000	-0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000

H_est(:, :, 2) =

1.0e-019 *

Columns 1 through 5

0.0212	-0.0779	0.0876	-0.0322	0.1146
-0.0153	0.0401	0.0560	0.0913	0.0361
-0.0078	-0.0317	0.1252	0.2020	0.3024
-0.0006	0.0091	-0.1198	-0.0628	0
0.1517	-0.1476	0	0	0

Columns 6 through 10

0.3200	0.4678	-0.0499	-0.4376	0.1550
-0.0140	0.0027	0.2112	0	0
0.1923	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Iter =2

est =2 (convergência na 2ª estimativa)

Optimization terminated successfully: Magnitude of directional derivative in search direction less than 2*options.TolFun and maximum constraint violation is less than options.TolCon

H_est(:, :, 1) =

Columns 1 through 5

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0.0396	-0.0000

Columns 6 through 10

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0.0000
0	0	-0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
-0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

H_est(:, :, 2) =

1.0e-018 *

Columns 1 through 5

0	-0.0183	-0.0093	-0.0211	0.0749
0.0380	0.0194	-0.1541	0.0908	-0.2043
-0.0029	-0.1045	0.2095	0.0733	-0.0050
-0.0120	-0.0053	-0.0267	-0.0773	-0.0138
0.4227	-0.1016	0.8558	0	0

Columns 6 through 10

0.0266	-0.2299	-0.3080	-0.1966	0.0247
-0.0512	0.1898	0.2959	0.1931	0
-0.1135	-0.1214	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

H_est(:, :, 3) =

1.0e-018 *

Columns 1 through 5

-0.3445	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Columns 6 through 10

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Iter =3

est =2 (convergência na 2ª estimativa)

Optimization terminated successfully: Magnitude of directional derivative in search direction less than 2*options.TolFun and maximum constraint violation is less than options.TolCon

H_est(:,1) =

Columns 1 through 5

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0.6428

Columns 6 through 10

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	-0.0000	-0.0000
0	-0.0000	0.0000	-0.0000	0.0000
-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

H_est(:,2) =

1.0e-016 *

Columns 1 through 5

0	0	0.0397	-0.0268	-0.0967
0.0151	0.0016	-0.0072	0.0357	-0.0026
0.0146	0.0005	-0.0696	0.0363	-0.0003
0.0155	0.0075	0.0329	0.0262	-0.0739
0.1071	0.1622	-0.2284	-0.2530	0

Columns 6 through 10

-0.1282	0.1270	-0.1310	-0.0769	-0.0500
0.0234	0.0175	-0.0247	-0.0910	0.0980
0.0446	0.0004	0.0958	0	0
-0.0279	0	0	0	0
0	0	0	0	0

H_est(:,3) =

1.0e-016 *

Columns 1 through 5

-0.0256	0.3416	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Columns 6 through 10

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Iter =4

est =2 % (convergência na 2ª estimativa)

Optimization terminated successfully: Magnitude of directional derivative in search direction less than 2*options.TolFun and maximum constraint violation is less than options.TolCon

H_est(:,1) =

Columns 1 through 5

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Columns 6 through 10

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0.0000
0	0	0.0000	-0.0000	0.0000
1.1327	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000

H_est(:,2) =

1.0e-018 *

Columns 1 through 5

0	0	0	-0.0444	0.0242
0	-0.0585	-0.0034	-0.0124	-0.0124
-0.0229	0.0046	0.0025	-0.0048	0.0047
-0.0324	0.0052	-0.0203	-0.0019	0.0169
-0.1128	-0.1347	-0.2491	0.2707	-0.0882

Columns 6 through 10

0.0468	0.0136	0.0058	-0.0205	0.0813
-0.0170	-0.0137	0.0190	0.0062	0.0669
-0.0230	0.0199	0.0199	0.1439	0
-0.0137	0.1857	0	0	0
0	0	0	0	0

H_est(:,3) =

1.0e-019 *

Columns 1 through 5

-0.7537	0.3759	-0.1516	0	0
-0.6350	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Columns 6 through 10

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Iter =5

est =5 % (nº estimativas máximo=5)

Optimization terminated successfully: Magnitude of directional derivative in search direction less than 2*options.TolFun and maximum constraint violation is less than options.TolCon

H_est(:,1) =

Columns 1 through 5

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Columns 6 through 10

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0.0000	-0.0000
0	2.5201	-0.0000	0.0000	-0.0000

H_est(:,2) =

1.0e-017 *

Columns 1 through 5

0	0	0	0	0.0002
0	0	-0.0030	-0.0544	0.0067
0.0125	-0.0047	0.0005	0.0027	0.0392
-0.0133	0.0108	0.0085	-0.0059	-0.0173
0.0313	-0.0201	0.0638	-0.0129	-0.0718

Columns 6 through 10

-0.0060	0.0304	0.0116	0.0416	-0.0223
0.0131	-0.0207	0.0145	-0.0166	-0.0497
0.0424	0.0099	-0.0464	0.0046	-0.0532
0.0051	-0.0048	-0.0647	0	0
0.1863	0	0	0	0

H_est(:,3) =

1.0e-018 *

Columns 1 through 5

-0.4519	-0.2705	-0.3337	0.0364	0
-0.2794	0.4366	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Columns 6 through 10

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Iter =6

est =2 % (convergência na 2ª estimativa)

Optimization terminated successfully: Magnitude of directional derivative in search direction less than 2*options.TolFun and maximum constraint violation is less than options.TolCon

H_est(:,1) =

Columns 1 through 5

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Columns 6 through 10

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0.0000
0	0	1.4264	0.0000	-0.0000

H_est(:,2) =

1.0e-017 *

Columns 1 through 5

0	0	0	0	0
0	0	0	0.0121	0.0892
0	-0.0079	-0.0060	-0.0007	-0.0011
0.0064	0.0236	-0.0256	-0.0025	0.0325
0.0816	-0.1459	0.1294	-0.0313	-0.0285

Columns 6 through 10

-0.0094	0.0267	-0.0531	-0.0555	-0.0079
-0.0394	0.0191	0.0199	-0.0218	-0.0197
-0.0786	-0.0351	0.0044	0.0494	-0.0219
0.0187	-0.0002	-0.0121	-0.1502	0
0.0969	-0.1730	0	0	0

H_est(:,3) =

1.0e-017 *

Columns 1 through 5

-0.0150	0.0838	-0.0673	-0.0097	0.1034
0.0409	0.0647	0.0330	0	0
-0.0416	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Columns 6 through 10

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Iter =7

est =5 % (nº estimativas máximo=5)

Optimization terminated successfully: Magnitude of directional derivative in search direction less than 2*options.TolFun and maximum constraint violation is less than options.TolCon

H_est(:,1) =

Columns 1 through 5

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Columns 6 through 10

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	3.0558	0.0000

H_est(:,2) =

1.0e-017 *

Columns 1 through 5

0	0	0	0	0
0	0	0	0	-0.0069
0	0	-0.0052	0.1117	-0.0295
0.0006	-0.0136	0.0181	-0.0273	0.0110
-0.0148	-0.0479	0.0227	-0.0299	-0.1282

Columns 6 through 10

0	0.0140	0.0764	0.0004	-0.0521
0.0119	0.0025	-0.0312	0.0195	-0.0292
0.0125	0.0538	-0.0613	0.0004	-0.0683
0.0008	0.0122	0.0094	-0.0134	-0.0817
0.3450	-0.0382	0.0485	0	0

H_est(:,3) =

1.0e-018 *

Columns 1 through 5

-0.0402	0.5294	-0.2961	0.5315	0.0876
---------	--------	---------	--------	--------

-0.4635	0.4335	-0.4621	-0.3529	0
0.4577	-0.2333	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Columns 6 through 10

0.8275	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Iter =8

est =2 (convergência na 2ª estimativa)

Optimization terminated successfully: Magnitude of directional derivative in search direction less than 2*options.TolFun and maximum constraint violation is less than options.TolCon

H_est(:, :, 1) =

Columns 1 through 5

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Columns 6 through 10

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	1.7090

H_est(:, :, 2) =

1.0e-017 *

Columns 1 through 5

0	0	0	0	0
---	---	---	---	---

```

0    0    0    0    0
0    0    0  0.0009  0.0154
0 -0.0135  0.0025  0.0130  0.0085
0.0613  0.0507 -0.0010 -0.0870 -0.0556
Columns 6 through 10
0    0 -0.0006  0.0137  0.0273
0.0066 -0.0108 -0.0274 -0.0076 -0.0084
-0.0031  0.0153 -0.0199  0.0383  0.0206
-0.0009  0.0027 -0.0077 -0.0069 -0.0266
-0.0461 -0.0641  0.1065 -0.0115    0

```

H_est(:,3) =

1.0e-018 *

Columns 1 through 5

```

-0.3832  0.3238 -0.1240  0.5173 -0.9886
0.0202 -0.5502 -0.5446 -0.2357  0.4903
0.1455 -0.1562 -0.3627    0    0
0.5749    0    0    0    0
0    0    0    0    0

```

Columns 6 through 10

```

-0.4804  0.0994    0    0    0
0    0    0    0    0
0    0    0    0    0
0    0    0    0    0
0    0    0    0    0

```

Iter =9

est =4 % (convergência na 4ª estimativa)

Optimization terminated successfully: Magnitude of directional derivative in search direction less than 2*options.TolFun and maximum constraint violation is less than options.TolCon

H_est(:,1) =

Columns 1 through 8

```

0  0  0  0  0  0  0  0

```

```

0  0  0  0  0  0  0  0
0  0  0  0  0  0  0  0
0  0  0  0  0  0  0  0
0  0  0  0  0  0  0  0

```

Columns 9 through 10

```

0  0
0  0
0  0
0  0
0  0

```

H_est(:, :, 2) =

Columns 1 through 5

```

0      0      0      0      0
0      0      0      0      0
0      0      0      0 -0.0000
0      0 -0.0000  0.0000  0.0000
2.9162  0.0000 -0.0000  0.0000 -0.0000

```

Columns 6 through 10

```

0      0      0 -0.0000  0.0000
0 -0.0000  0.0000 -0.0000  0.0000
-0.0000  0.0000 -0.0000  0.0000 -0.0000
-0.0000 -0.0000 -0.0000 -0.0000  0.0000
0.0000  0.0000  0.0000  0.0000 -0.0000

```

H_est(:, :, 3) =

1.0e-022 *

Columns 1 through 5

```

-0.0338  0.0837 -0.0039 -0.1461  0.0485
0.0145  0.0251 -0.0043 -0.0616 -0.0039
-0.0374 -0.0735  0.0152  0.0605    0
-0.0209 -0.0169    0      0      0
0      0      0      0      0

```

Columns 6 through 10

```

0.0726 -0.1176 -0.2303    0    0
0.0226    0    0    0    0

```

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Iter =10

est =3 % (convergência na 3ª estimativa)

Optimization terminated successfully: Magnitude of directional derivative in search direction less than 2*options.TolFun and maximum constraint violation is less than options.TolCon

H_est(:,1) =

Columns 1 through 8

0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

Columns 9 through 10

0	0
0	0
0	0
0	0
0	0

H_est(:,2) =

Columns 1 through 5

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0.0000	0.0000
0	2.2322	-0.0000	-0.0000	0.0000

Columns 6 through 10

0	0	0	0	0.0000
0	0	0.0000	-0.0000	0.0000
-0.0000	-0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000

```

0.0000 -0.0000 -0.0000 -0.0000 0.0000
0.0000 -0.0000 -0.0000 0.0000 -0.0000

```

H_est(:,3) =

1.0e-017 *

Columns 1 through 5

```

-0.0127 -0.0031 0.0246 -0.0121 0.0110
-0.0155 0.0038 -0.0160 0.0190 0.0178
-0.0057 -0.0035 -0.0193 0.0138 0.0173
0.0070 0.0387 0.0261 0 0
0.1058 0 0 0 0

```

Columns 6 through 10

```

0.0070 -0.0461 0.0084 -0.0062 0
0.0109 0.0080 0 0 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0

```

Custo Real Acumulado [s] = 292186.132620

% Custo do Sistema BRT ou atraso total
dos passageiros para um percurso de dez
pontos

APÊNDICE 4

Este apêndice apresenta as principais informações do arquivo de saída do programa MatLab, relativo aos resultados obtidos via CIPER, para as variáveis de controle de retenção $h_{i,\omega}$ e instante de partida $d_{i,\omega}$ conforme apresentado na Tabela 5.1 do Capítulo 5. O exemplo considera um máximo de cinco estimativas, tolerância máxima de 5 s e um horizonte de predição de seis pontos ($n_N=6$), com um percurso de dez pontos para cada ônibus (ou dez iterações) dentro do circuito fechado BRT. Por simplificação e por restrições de espaço, somente são apresentados os dados relativos à última estimativa (estimativa com convergência da variável de controle ou n° máximo de estimativas) e para o caso prioridade condicional.

 % ----- Dados de Entrada -----

num_iter=10 % n° de iterações

num_est_max=5 % n° máximo de estimativas

tolerancia_maxima=5 % tolerância máxima para convergência da variável de controle

ni=5 % n° de ônibus

nk=10 % n° de pontos

nN=6 % n° de pontos do horizonte de predição

% constantes de embarque e desembarque de passageiros nos pontos [s]

C0=12

C1=0.48

C2=0.42


```

emin=0          % espaçamento mínimo entre ônibus

h_max =inf      % retenção máxima dos ônibus nos pontos

vbus=60         % velocidade dos ônibus no circuito BRT [km/h]

lbd =[0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2] % taxa de chegada de passageiros aos pontos k
                                         [passageiros/s]

r =[60  60  60  60  60  60  60  60] % tempo de viagem dos ônibus entre pontos [s]

q=[0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2] % fração de passageiros que desembarcam nos
                                         pontos

D_in(:,1)=[-2 -2 -2 -2 -2 -2 -2 -2 60 130; % valores iniciais di,k* [s]
            -2 -2 -2 -2 -2 -2 60 130 -2 -2; % valores não iniciais = -2
            -2 -2 -2 -2 0 70 -2 -2 -2 -2;
            -2 -2 60 130 -2 -2 -2 -2 -2 -2;
            60 130 -2 -2 -2 -2 -2 -2 -2 -2]

L_in(:,1)=[-2 -2 -2 -2 -2 -2 -2 -2 0 20; % valores iniciais li,k*
            -2 -2 -2 -2 -2 -2 0 20 -2 -2; % valores não iniciais = -2
            -2 -2 -2 -2 0 20 -2 -2 -2 -2;
            -2 -2 0 20 -2 -2 -2 -2 -2 -2;
            0 20 -2 -2 -2 -2 -2 -2 -2 -2]

% ----- Dados de Saída MSAM -----

Iter=1 % nº da iteração

est=2 % nº da estimativa (convergência na 2ª estimativa)

Optimization terminated successfully: First-order optimality measure less than options.TolFun and
maximum constraint violation is less than options.TolCon

H_est(:,1) = % matriz das ações de controle h(i,k,m)

```

Columns 1 through 5

```

0    0    0    0    0
0    0    0    0    0
0    0    0    0    0
0    0    0    0  0.0000
0    0  9.6099 -0.0000 -0.0000

```

Columns 6 through 10

```

0    0    0    0    0
0    0    0 13.3312  0.0000
0 14.1312 -0.0000 -0.0000  0.0000
0.0000 -0.0000 -0.0000  0.0000 -0.0000
0.0000  0.0000 -0.0000    0    0

```

H_est(:, :, 2) =

Columns 1 through 5

```

12.9204 -0.0000  0.0000  0.0000 -0.0000
0  0.0000 -0.0000 -0.0000    0
-0.0000 -0.0000    0    0    0
0    0    0    0    0
0    0    0    0    0

```

Columns 6 through 10

```

0.0000    0    0    0    0
0    0    0    0    0
0    0    0    0    0
0    0    0    0    0
0    0    0    0    0

```

D_hor(:, :, 1) =

% matriz dos instantes de partida d(i,k,m)

Columns 1 through 5

```

-2.0000 -2.0000 -2.0000 -2.0000 -2.0000
-2.0000 -2.0000 -2.0000 -2.0000 -2.0000
-2.0000 -2.0000 -2.0000 -2.0000    0
-2.0000 -2.0000 60.0000 130.0000 223.4513
60.0000 130.0000 226.6895 316.6035 406.1417

```

Columns 6 through 10

```

-2.0000 -2.0000 -2.0000 60.0000 130.0000

```

```
-2.0000  60.0000 130.0000 230.4109 320.7200
70.0000 164.8391 248.1849 329.7184 410.3200
319.3931 415.4519 512.8608 611.9555 713.0142
495.0000 583.0936 670.1980 -2.0000 -2.0000
```

D_hor(:, :, 2) =

Columns 1 through 5

```
230.0000 320.2655 409.8488 499.3970 588.9462
410.0000 499.1753 588.3074 677.3952      0
490.0000 568.6716      0      0      0
      0      0      0      0      0
      0      0      0      0      0
```

Columns 6 through 10

```
678.5688      0      0      0      0
      0      0      0      0      0
      0      0      0      0      0
      0      0      0      0      0
      0      0      0      0      0
```

Iter =2

est =2 % (convergência na 2ª estimativa)

Optimization terminated successfully: Magnitude of directional derivative in search direction less than 2*options.TolFun and maximum constraint violation is less than options.TolCon

H_est(:, :, 1) =

Columns 1 through 5

```
      0      0      0      0      0
      0      0      0      0      0
      0      0      0      0      0
      0      0      0      0      0
      0      0      0  0.7036 -0.0000
```

Columns 6 through 10

```
      0      0      0      0      0
      0      0      0      0  0.0000
```

```

      0      0  0.0000 -0.0000 -0.0000
8.1073  0.0000 -0.0000  0.0000  0.0000
-0.0000 -0.0000  0.0000 -0.0000    0

```

H_est(:, :, 2) =

Columns 1 through 5

```

      0  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000
-0.0000  0.0000  0.0000  0.0000 -0.0000
0.0000 -0.0000  0.0000    0    0
0.2282    0    0    0    0
      0    0    0    0    0

```

Columns 6 through 10

```

0.0000  0.0000    0    0    0
      0    0    0    0    0
      0    0    0    0    0
      0    0    0    0    0
      0    0    0    0    0

```

D_hor(:, :, 1) =

Columns 1 through 5

```

-2.0000 -2.0000 -2.0000 -2.0000 -2.0000
-2.0000 -2.0000 -2.0000 -2.0000 -2.0000
-2.0000 -2.0000 -2.0000 -2.0000    0
-2.0000 -2.0000 60.0000 130.0000 223.4513
60.0000 130.0000 226.6895 317.3070 406.9200

```

Columns 6 through 10

```

-2.0000 -2.0000 -2.0000 60.0000 130.0000
-2.0000 60.0000 130.0000 230.4109 320.7200
70.0000 164.8391 248.1849 329.7184 410.3200
327.5003 424.4201 522.7814 622.9296 725.1537
495.0000 582.1412 668.0909 752.5329 -2.0000

```

D_hor(:, :, 2) =

Columns 1 through 5

```

230.0000 320.2655 409.8488 499.3222 588.7809
410.0000 499.1753 588.3074 677.4031 766.4604

```

490.0000	568.6716	646.5628	0	0
830.0000	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Columns 6 through 10

678.3859	768.2526	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Iter =3

est =4 % (convergência na 4ª estimativa)

Optimization terminated successfully: Magnitude of directional derivative in search direction less than 2*options.TolFun and maximum constraint violation is less than options.TolCon

H_est(:,1) =

Columns 1 through 5

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	-0.0000

Columns 6 through 10

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	45.6892	0.0000
0	11.6457	-0.0000	-0.0000	0.0000
-0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0000

H_est(:,2) =

Columns 1 through 5

0	0	0.0000	0.0000	-0.0000
-0.0000	-0.0000	0.0000	-0.0000	0.0000
-0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000	0

0.6020	-0.0000	0	0	0
--------	---------	---	---	---

0	0	0	0	0
---	---	---	---	---

Columns 6 through 10

-0.0000	0.0000	-0.0000	0	0
---------	--------	---------	---	---

0.0000	0	0	0	0
--------	---	---	---	---

0	0	0	0	0
---	---	---	---	---

0	0	0	0	0
---	---	---	---	---

0	0	0	0	0
---	---	---	---	---

D_hor(:, :, 1) =

Columns 1 through 5

-2.0000	-2.0000	-2.0000	-2.0000	-2.0000
---------	---------	---------	---------	---------

-2.0000	-2.0000	-2.0000	-2.0000	-2.0000
---------	---------	---------	---------	---------

-2.0000	-2.0000	-2.0000	-2.0000	0
---------	---------	---------	---------	---

-2.0000	-2.0000	60.0000	130.0000	223.4513
---------	---------	---------	----------	----------

60.0000	130.0000	226.6895	317.3070	406.9200
---------	----------	----------	----------	----------

Columns 6 through 10

-2.0000	-2.0000	-2.0000	60.0000	130.0000
---------	---------	---------	---------	----------

-2.0000	60.0000	130.0000	230.4109	320.7200
---------	---------	----------	----------	----------

70.0000	164.8391	248.1849	375.4076	460.8612
---------	----------	----------	----------	----------

327.5003	436.0658	535.6637	632.3281	730.1830
----------	----------	----------	----------	----------

495.0000	580.9045	665.3549	748.5082	830.5812
----------	----------	----------	----------	----------

D_hor(:, :, 2) =

Columns 1 through 5

230.0000	320.2655	409.8488	499.3222	588.7809
----------	----------	----------	----------	----------

410.0000	499.1753	588.3074	677.4031	766.4604
----------	----------	----------	----------	----------

545.9084	630.5172	714.6457	798.2467	0
----------	----------	----------	----------	---

830.0000	930.8300	0	0	0
----------	----------	---	---	---

0	0	0	0	0
---	---	---	---	---

Columns 6 through 10

678.3859	768.3839	858.9711	0	0
----------	----------	----------	---	---

855.4594	0	0	0	0
----------	---	---	---	---

0	0	0	0	0
---	---	---	---	---

0	0	0	0	0
---	---	---	---	---

0	0	0	0	0
---	---	---	---	---

Iter =4

est =2 % (convergência na 2ª estimativa)

Optimization terminated successfully: First-order optimality measure less than options.TolFun and maximum constraint violation is less than options.TolCon

H_est(:,1) =

Columns 1 through 5

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Columns 6 through 10

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	3.6988
0	0	0.0000	-0.0000	-0.0000
20.0000	4.7213	0.0000	0.0000	-0.0000

H_est(:,2) =

Columns 1 through 5

0	0	0	-0.0000	0.0000
0	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000
0.0000	0	0.0000	0.0000	0.0000
1.4710	-0.0000	-0.0000	0	0
0.0000	0	0	0	0

Columns 6 through 10

-0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000	0
-0.0000	-0.0000	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

D_hor(:, :, 1) =

Columns 1 through 5

-2.0000	-2.0000	-2.0000	-2.0000	-2.0000
-2.0000	-2.0000	-2.0000	-2.0000	-2.0000
-2.0000	-2.0000	-2.0000	-2.0000	0
-2.0000	-2.0000	60.0000	130.0000	223.4513
60.0000	130.0000	226.6895	317.3070	406.9200

Columns 6 through 10

-2.0000	-2.0000	-2.0000	60.0000	130.0000
-2.0000	60.0000	130.0000	230.4109	320.7200
70.0000	164.8391	248.1849	375.4076	464.5600
327.5003	436.0658	535.6637	632.3281	729.7902
515.0000	607.7498	695.0509	781.3578	866.4800

D_hor(:, :, 2) =

1.0e+003 *

Columns 1 through 5

0.2300	0.3203	0.4098	0.4993	0.5888
0.4100	0.4992	0.5883	0.6774	0.7665
0.5500	0.6350	0.7197	0.8038	0.8874
0.8300	0.9303	1.0324	0	0
0.9500	0	0	0	0

Columns 6 through 10

0.6763	0.7632	0.8501	0.9370	0
0.8557	0.9452	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Iter =5

est =2 % (convergência na 2ª estimativa)

Optimization terminated successfully: First-order optimality measure less than options.TolFun and maximum constraint violation is less than options.TolCon

H_est(:, :, 1) =

Columns 1 through 5

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Columns 6 through 10

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0.0000	-0.0000
0	4.7213	-0.0000	-0.0000	-0.0000

H_est(:, :, 2) =

Columns 1 through 5

0	0	0	0	0.0000
0	0	0.0000	-0.0000	0
0.0000	16.4234	0.0000	0.0000	0.0000
1.4710	-0.0000	0.0000	-0.0000	0
-0.0000	0.0000	0	0	0

Columns 6 through 10

0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000
0.0000	-0.0000	-0.0000	0	0
0.0000	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

D_hor(:, :, 1) =

Columns 1 through 5

-2.0000	-2.0000	-2.0000	-2.0000	-2.0000
-2.0000	-2.0000	-2.0000	-2.0000	-2.0000
-2.0000	-2.0000	-2.0000	-2.0000	0
-2.0000	-2.0000	60.0000	130.0000	223.4513
60.0000	130.0000	226.6895	317.3070	406.9200

Columns 6 through 10

```

-2.0000 -2.0000 -2.0000 60.0000 130.0000
-2.0000 60.0000 130.0000 230.4109 320.7200
70.0000 164.8391 248.1849 375.4076 464.5600
327.5003 436.0658 535.6637 632.3281 729.7902
515.0000 607.7498 695.0509 781.3578 866.4800

```

D_hor(:, :, 2) =

1.0e+003 *

Columns 1 through 5

```

0.2300 0.3203 0.4098 0.4993 0.5888
0.4100 0.4992 0.5883 0.6774 0.7665
0.5500 0.6515 0.7378 0.8239 0.9096
0.8300 0.9286 1.0285 1.1299 0
0.9500 1.0332 0 0 0

```

Columns 6 through 10

```

0.6763 0.7632 0.8501 0.9370 1.0241
0.8557 0.9452 1.0349 0 0
0.9950 0 0 0 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0

```

Iter =6

est =3 % (convergência na 3ª estimativa)

Optimization terminated successfully: First-order optimality measure less than options.TolFun and maximum constraint violation is less than options.TolCon

H_est(:, :, 1) =

1.0e-013 *

Columns 1 through 5

```

0 0 0 0 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0

```

Columns 6 through 10

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0.0000
0	0	0.4520	0.0000	-0.0000

H_est(:, :, 2) =

Columns 1 through 5

0	0	0	0	0
0	0	0	0.4010	-0.0000
0	43.1581	-0.0000	-0.0000	0.0000
1.4710	0.0000	0.0000	-0.0000	0.0000
-0.0000	-0.0000	-0.0000	0	0

Columns 6 through 10

11.0708	0.0000	0	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000	0
-0.0000	-0.0000	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

H_est(:, :, 3) =

Columns 1 through 8

0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

Columns 9 through 10

0	0
0	0
0	0
0	0
0	0

D_hor(:, :, 1) =

Columns 1 through 5

```
-2.0000 -2.0000 -2.0000 -2.0000 -2.0000
-2.0000 -2.0000 -2.0000 -2.0000 -2.0000
-2.0000 -2.0000 -2.0000 -2.0000    0
-2.0000 -2.0000 60.0000 130.0000 223.4513
60.0000 130.0000 226.6895 317.3070 406.9200
```

Columns 6 through 10

```
-2.0000 -2.0000 -2.0000 60.0000 130.0000
-2.0000 60.0000 130.0000 230.4109 320.7200
70.0000 164.8391 248.1849 375.4076 464.5600
327.5003 436.0658 535.6637 632.3281 729.7902
515.0000 607.7498 695.0509 781.3578 866.4800
```

D_hor(:, :, 2) =

1.0e+003 *

Columns 1 through 5

```
0.2300 0.3203 0.4098 0.4993 0.5888
0.4100 0.4992 0.5883 0.6778 0.7669
0.5500 0.6782 0.7674 0.8566 0.9457
0.8300 0.9258 1.0222 1.1195 1.2176
0.9500 1.0332 1.1160    0    0
```

Columns 6 through 10

```
0.6873 0.7754 0.8636 0.9520 1.0407
0.8550 0.9431 1.0312 1.1192    0
1.0350 1.1244    0    0    0
    0    0    0    0    0
    0    0    0    0    0
```

D_hor(:, :, 3) =

Columns 1 through 4

```
1130    0    0    0
    0    0    0    0
    0    0    0    0
    0    0    0    0
    0    0    0    0
```

Columns 5 through 8

0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0

Columns 9 through 10

0	0
0	0
0	0
0	0
0	0

Iter =7

est =2 % (convergência na 2ª estimativa)

Optimization terminated successfully: First-order optimality measure less than options.TolFun and maximum constraint violation is less than options.TolCon

H_est(:,1) =

1.0e-027 *

Columns 1 through 5

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Columns 6 through 10

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	-0.1415	0.1791

H_est(:,2) =

Columns 1 through 5

```

0    0    0    0    0
0    0    0    0  0.0000
0    0  0.0000    0  0.0000
1.4710  0.0000  0.0000  0.0000 -0.0000
-0.0000    0    0  0.0000    0

```

Columns 6 through 10

```

0  0.0000    0 -0.0000  0.0000
-0.0000 -0.0000  0.0000  0.0000 -0.0000
0    0    0    0    0
18.3982    0    0    0    0
0    0    0    0    0

```

H_est(:, :, 3) =

Columns 1 through 8

```

0  0  0  0  0  0  0  0
0  0  0  0  0  0  0  0
0  0  0  0  0  0  0  0
0  0  0  0  0  0  0  0
0  0  0  0  0  0  0  0

```

Columns 9 through 10

```

0  0
0  0
0  0
0  0
0  0

```

D_hor(:, :, 1) =

Columns 1 through 5

```

-2.0000 -2.0000 -2.0000 -2.0000 -2.0000
-2.0000 -2.0000 -2.0000 -2.0000 -2.0000
-2.0000 -2.0000 -2.0000 -2.0000    0
-2.0000 -2.0000  60.0000 130.0000 223.4513
60.0000 130.0000 226.6895 317.3070 406.9200

```

Columns 6 through 10

```

-2.0000 -2.0000 -2.0000  60.0000 130.0000
-2.0000  60.0000 130.0000 230.4109 320.7200

```

```

70.0000 164.8391 248.1849 375.4076 464.5600
327.5003 436.0658 535.6637 632.3281 729.7902
515.0000 607.7498 695.0509 781.3578 866.4800

```

D_hor(:, :, 2) =

1.0e+003 *

Columns 1 through 5

```

0.2300 0.3203 0.4098 0.4993 0.5888
0.4100 0.4992 0.5883 0.6778 0.7669
0.5500 0.6782 0.7674 0.8566 0.9457
0.8300 0.9258 1.0222 1.1195 1.2176
0.9500 1.0332 1.1160 1.1982 0

```

Columns 6 through 10

```

0.6873 0.7754 0.8636 0.9520 1.0407
0.8550 0.9431 1.0312 1.1192 1.2072
1.0350 1.1244 1.2140 0 0
1.3350 0 0 0 0
0 0 0 0 0

```

D_hor(:, :, 3) =

1.0e+003 *

Columns 1 through 5

```

1.1300 1.2199 0 0 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0

```

Columns 6 through 10

```

0 0 0 0 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0

```

Iter = 8

est=2 % (convergência na 2ª estimativa)

Optimization terminated successfully: First-order optimality measure less than options.TolFun and maximum constraint violation is less than options.TolCon

H_est(:,1) =

1.0e-013 *

Columns 1 through 5

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Columns 6 through 10

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0.1902

H_est(:,2) =

Columns 1 through 5

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0.7823	-0.0000
0	-0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0000
-0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000

Columns 6 through 10

0	0	0.0000	-0.0000	0.0000
9.0142	-0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000
-0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000	0
18.6016	-0.0000	0	0	0
0	0	0	0	0

H_est(:,3) =

1.0e-028 *

Columns 1 through 5

-0.7415	-0.0730	-0.2593	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Columns 6 through 10

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

D_hor(:, :, 1) =

Columns 1 through 5

-2.0000	-2.0000	-2.0000	-2.0000	-2.0000
-2.0000	-2.0000	-2.0000	-2.0000	-2.0000
-2.0000	-2.0000	-2.0000	-2.0000	0
-2.0000	-2.0000	60.0000	130.0000	223.4513
60.0000	130.0000	226.6895	317.3070	406.9200

Columns 6 through 10

-2.0000	-2.0000	-2.0000	60.0000	130.0000
-2.0000	60.0000	130.0000	230.4109	320.7200
70.0000	164.8391	248.1849	375.4076	464.5600
327.5003	436.0658	535.6637	632.3281	729.7902
515.0000	607.7498	695.0509	781.3578	866.4800

D_hor(:, :, 2) =

1.0e+003 *

Columns 1 through 5

0.2300	0.3203	0.4098	0.4993	0.5888
0.4100	0.4992	0.5883	0.6778	0.7669
0.5500	0.6782	0.7674	0.8573	0.9466
0.8300	0.9258	1.0222	1.1194	1.2174
0.9500	1.0332	1.1160	1.1982	1.2796

Columns 6 through 10

0.6873	0.7754	0.8636	0.9520	1.0407
0.8640	0.9531	1.0422	1.1314	1.2207
1.0350	1.1233	1.2116	1.2998	0
1.3350	1.4371	0	0	0
0	0	0	0	0

D_hor(:, :, 3) =

1.0e+003 *

Columns 1 through 5

1.1300	1.2199	1.3106	0	0
1.3100	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Columns 6 through 10

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Iter =9

est =2 % (convergência na 2ª estimativa)

Optimization terminated successfully: First-order optimality measure less than options.TolFun and maximum constraint violation is less than options.TolCon

H_est(:, :, 1) =

Columns 1 through 8

0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

Columns 9 through 10

```

0  0
0  0
0  0
0  0
0  0

```

H_est(:, :, 2) =

Columns 1 through 5

```

0    0    0    0    0
0    0    0    0    0
0    0    0    0  0.0000
0    0 -0.0000 -0.0000  0.0000
20.0000  8.1937  0.0000 -0.0000 -0.0000

```

Columns 6 through 10

```

0    0    0  1.7357 -0.0000
0  0.3013 -0.0000  0.0000 -0.0000
0.0000 -0.0000 -0.0000 -0.0000 -0.0000
18.6016  0.0000  0.0000    0    0
0.0000    0    0    0    0

```

H_est(:, :, 3) =

1.0e-013 *

Columns 1 through 5

```

-0.0003 -0.1100 -0.1262 -0.0487    0
-0.0248 -0.0277    0    0    0
0    0    0    0    0
0    0    0    0    0
0    0    0    0    0

```

Columns 6 through 10

```

0    0    0    0    0
0    0    0    0    0
0    0    0    0    0
0    0    0    0    0
0    0    0    0    0

```

D_hor(:, :, 1) =

Columns 1 through 5

```
-2.0000 -2.0000 -2.0000 -2.0000 -2.0000
-2.0000 -2.0000 -2.0000 -2.0000 -2.0000
-2.0000 -2.0000 -2.0000 -2.0000      0
-2.0000 -2.0000 60.0000 130.0000 223.4513
60.0000 130.0000 226.6895 317.3070 406.9200
```

Columns 6 through 10

```
-2.0000 -2.0000 -2.0000 60.0000 130.0000
-2.0000 60.0000 130.0000 230.4109 320.7200
70.0000 164.8391 248.1849 375.4076 464.5600
327.5003 436.0658 535.6637 632.3281 729.7902
515.0000 607.7498 695.0509 781.3578 866.4800
```

D_hor(:, :, 2) =

1.0e+003 *

Columns 1 through 5

```
0.2300 0.3203 0.4098 0.4993 0.5888
0.4100 0.4992 0.5883 0.6778 0.7669
0.5500 0.6782 0.7674 0.8573 0.9466
0.8300 0.9258 1.0222 1.1194 1.2174
0.9700 1.0625 1.1465 1.2298 1.3127
```

Columns 6 through 10

```
0.6873 0.7754 0.8636 0.9537 1.0426
0.8640 0.9534 1.0425 1.1316 1.2207
1.0350 1.1233 1.2115 1.2997 1.3877
1.3350 1.4371 1.5407      0      0
1.3950      0      0      0      0
```

D_hor(:, :, 3) =

1.0e+003 *

Columns 1 through 5

```
1.1300 1.2168 1.3039 1.3914      0
1.3100 1.3995      0      0      0
      0      0      0      0      0
      0      0      0      0      0
      0      0      0      0      0
```

Columns 6 through 10

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Iter =10

est =2 % (convergência na 2ª estimativa)

Optimization terminated successfully: First-order optimality measure less than options.TolFun and maximum constraint violation is less than options.TolCon

H_est(:,1) =

Columns 1 through 8

0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

Columns 9 through 10

0	0
0	0
0	0
0	0
0	0

H_est(:,2) =

Columns 1 through 5

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	-0.0000	0.0000
0	8.1937	0	-0.0000	-0.0000

Columns 6 through 10

0	0	0	0	-0.0000
0	0	0.0000	-0.0000	-0.0000
8.6949	-0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000
19.5249	-0.0000	0.0000	-0.0000	0
-0.0000	0.0000	0	0	0

H_est(:, :, 3) =

1.0e-028 *

Columns 1 through 5

0.1150	-0.1095	-0.0485	0.0250	-0.1588
0.0570	0.0152	-0.0819	0	0
-0.1602	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Columns 6 through 10

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

D_hor(:, :, 1) =

Columns 1 through 5

-2.0000	-2.0000	-2.0000	-2.0000	-2.0000
-2.0000	-2.0000	-2.0000	-2.0000	-2.0000
-2.0000	-2.0000	-2.0000	-2.0000	0
-2.0000	-2.0000	60.0000	130.0000	223.4513
60.0000	130.0000	226.6895	317.3070	406.9200

Columns 6 through 10

-2.0000	-2.0000	-2.0000	60.0000	130.0000
-2.0000	60.0000	130.0000	230.4109	320.7200
70.0000	164.8391	248.1849	375.4076	464.5600
327.5003	436.0658	535.6637	632.3281	729.7902
515.0000	607.7498	695.0509	781.3578	866.4800

D_hor(:, :, 2) =

1.0e+003 *

Columns 1 through 5

0.2300	0.3203	0.4098	0.4993	0.5888
0.4100	0.4992	0.5883	0.6778	0.7669
0.5500	0.6782	0.7674	0.8573	0.9466
0.8300	0.9258	1.0222	1.1194	1.2174
0.9700	1.0625	1.1465	1.2298	1.3127

Columns 6 through 10

0.6873	0.7754	0.8636	0.9537	1.0426
0.8640	0.9534	1.0425	1.1316	1.2207
1.0437	1.1329	1.2222	1.3114	1.4007
1.3350	1.4361	1.5385	1.6422	0
1.3950	1.4763	0	0	0

D_hor(:, :, 3) =

1.0e+003 *

Columns 1 through 5

1.1300	1.2168	1.3039	1.3914	1.4795
1.3100	1.3995	1.4893	0	0
1.4900	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Columns 6 through 10

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Custo Real Acumulado [s] = 335480.815143

% Custo do Sistema BRT ou atraso total
dos passageiros para um percurso de dez
pontos

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABKOWITZ, M. and ENGELSTEIN, I.; 1984. Methods for Maintaining Transit Service Regularity. *Transportation Research Record*, 961, p. 1-8.

ABU-LEBDEH, G. and BENEKOHAL, R.F.; 1997. Development of Traffic Control and Queue Management Procedures for Oversaturated Arterials. *Transportation Research Record*, ISSUE No. 1603, Paper No. 970707, p. 119-127.

BAKER, R.J., CHANG, J., SMITH, H.R.; 2002. An Overview of Transit Signal Priority. *Intelligent Transportation Society of America* (ITS America).

BALKE, K., URBANIK, D. and CONRAD, L.; 2000. Development and Evaluation of Intelligent Bus Priority Concept. *Transportation Research Record*, No. 1727, p. 12-19.

BUKKAPATNAM, S.; DESSOUKY, M. and ZHAO, J.; 2003. *Distributed Architecture for Real-Time Coordination in Transit Networks*. Final Report, Metrans Project 00-13.

CHADA, S. and NEWLAND, R.; 2002. *Effectiveness of Bus Signal Priority*. Report No. NCTR-416-04, National Center For Transit Research (NCTR).

CIMA, B., CORBY, M., GULICK, R., VAHIDI, H.; 2000. Transit Signal Priority: A Comparison of Recent and Future Implementations. Paper presented at *ITE 2000 Annual Meeting*, Nashville, TN, 6-10.

DESAULNIERS, G. and HICKMAN, M.D.; 2003. Public Transit. *Les Cahiers du GERAD*, G-2003-77.

DIAKAKI, C., DINOPOULOU, V. and PAPAGEORGIOU, M.; 2003. Deliverable No. 7: Public Transport Priority in TUC. SMART NETS IST-2000-28090, *Signal Management in Real Time for Urban Traffic Networks*, Version 2.

DION, F. and HELLINGA, B.; 2001. A Methodology for Obtaining Signal Coordination within A Distributed Real-Time Network Signal Control System with Transit Priority. *Preprint CD-ROM of the 80th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, DC, USA.

DION, F. and HELLINGA B.; 2002. A Rule-Based Real-Time Traffic Responsive Signal Control System with Transit Priority: Application to an Isolated Intersection. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 36, Issue 4.

DION, F., RAKHA, H. and ZHANG, Y.; 2004. Evaluation of Potential Transit Signal Priority Benefits Along Fixed-Time Signalized Arterial. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 130, Issue 3, p.294-303.

DUERR, P.; 2000. Dynamic Right-of-Way for Transit Vehicles: Integrated Modeling Approach for Optimizing Signal Control on Mixed Traffic Arterials. *Transportation Research Record*, No. 1731, p. 31-39.

EBERLEIN, X.J., WILSON, N.H.M. and BERNSTEIN, D.; 1999. Modeling Real-Time Control Strategies in Public Transit Operations. Wilson, N.H.M. (Ed.), *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems: Computer Aided Transit Scheduling*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Vol. 471, p. 325–346.

EBERLEIN, X.J., WILSON, N.H.M. and BERNSTEIN, D.; 2001. The Holding Problem with Real-Time Information Available. *Transportation Science*, Vol. 35, n. 1, p. 1-18.

EICHLER, M.D. and DAGANZO, C.; 2005. Bus Lanes with Intermittent Priority: Screening Formulae and an Evaluation. Working paper, *UC Berkeley Center for Future Urban Transport*.

ENGELBRECHT, R. J.; 1997. *Coordinating Diamond Interchange and Arterial Street Signal Control*. Texas, USA. Dissertation (Master of Science, Major Subject: Civil Engineering) – Texas A&M University.

FEHON, K.; 2004. Adaptive Traffic Signals: Are We Missing the Boat? *ITE District 6 Annual Meeting*, 2004, USA.

FLAMM, B.; 2001. *Advanced Technologies in Public Transportation*. Berkeley University of California Transportation Center, University of California.

FU, L., LIU, Q. and CALAMAI, P.; 2003. A Real-Time Optimization Model for Dynamic Scheduling of Transit Operations. *82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, DC.

FURTH, P. and MULLER, T.; 2000. Conditional Bus Priority at Signalized Intersections: Better Service with Less Traffic Disruption. *Transportation Research Record*, No. 1731, p. 23-30.

GALLEGO, J.L, FARGES, J.L. and HENRY, J.J.; 1997. Traffic Queue Estimation. *Sociedad de Estadística e Investigación Operativa*, Vol. 5, No.1, 1997, p. 81–93.

GARTNER, N.H. and STAMATIADIS, C.; 2002. Arterial-Based Control of Traffic Flow in Urban Grid Networks. *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 35, p. 657-671.

GARROW, M. and MACHEMEHL, R.; 1998. *Development and Evaluation of Transit Signal Priority Strategies*. Center for Transportation Research, University of Texas, Austin, Transportation Research Board, Washington, D.C.

GAZIS, D.; 2002. *Traffic Flow*. Kluwer Academic Publishers, London, UK.

GERLOUGH, D. and HUBER, M.; 1975. Traffic Flow Theory. *TRB Special Report 165*, Chap. 8, p. 159, Transportation Research Council, Washington, D.C.

HEAD, K.L.; 1998. *Improved Traffic Signal Priority for Transit*. TCRP Project A-16 Interim report.

HEYDECKER, B.G.; 1983. Capacity at a Signal-Controlled Junction where there is Priority for Buses. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 17, No. 5, p. 341-357.

HICKMAN, M.; 2001. An Analytic Stochastic Model for the Transit Vehicle Holding Problem. *Transportation Science*, Vol. 35, n. 3, 215–237.

HUNTER-ZAWORSKI, K., KLOOS, W. and DANAHER, A.; 1995. Bus Priority at Traffic Signals in Portland: The Powell Boulevard Pilot Project. *Transportation Research Record*, No. 1503, p. 29-33.

JACQUES, K. St.; 1997. *Operational Analysis of Bus Lanes on Arterials*. Transit Cooperative Research Program – TCRP, Report 26, Washington, D.C.

JANOS, M and FURTH, P.; 2002. Bus Priority with Highly Interruptible Traffic Signal Control: Simulation of San Juan's Avenida Ponce de Leon. *Transportation Research Record*, No. 1811, p. 157-165.

KIM, W.; 2004. *An Improved Bus Signal Priority System for Networks with Nearside Bus Stops*. Texas, USA. Thesis (Doctor of Philosophy, Major Subject: Civil Engineering) – Texas A&M University.

KOEHLER, L.A. and KRAUS Jr., W.; 2006a. A Controlled Departure Method for Bus Priority Operation. In Proceedings of the *11th IFAC (International Federation of Automatic Control) Symposium on Control in Transportation Systems*, Vol. 1, p. 7-13.

KOEHLER, L.A. e KRAUS Jr., W.; 2006b. Sistema de Prioridade para Ônibus com Controle da Partida do Ponto. *Em Anais XX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Brasília, DF, Brasil, Vol. II, p. 162-173.

KOEHLER, L.A.; KRAUS Jr., W. e CAMPONOGARA, E.; 2007. Controle de Retenção para Sistemas de Transporte Público. *Em Anais do XXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

KOEHLER, L.A.; KRAUS Jr., W. e CAMPONOGARA, E.; 2008a. Análise por Simulação do Controle por Retenção de um Sistema BRT. *Em Anais do XV Congresso Panamericano de Engenharia de Trânsito e Transporte*, Cartagena das Índias, Colômbia.

KOEHLER, L.A.; KRAUS Jr., W. e CAMPONOGARA, E.; 2008b. Controle Integrado de Prioridade e Retenção para Sistemas BRT. *Em Anais do XXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Fortaleza, CE, Brasil.

KOEHLER, L.A. and KRAUS Jr., W.; 2009. Simultaneous Control of Traffic Lights and Bus Departure for Priority Operation. *Transportation Research Part C*, doi: 10.1016/j.trc.2009.01.007.

KOVVALI, V.G.; 2001. *Development of a Robust Arterial Signal Coordination*. Texas, USA. Thesis (Doctor of Philosophy, Major Subject: Civil Engineering) – Texas A&M University.

LIN, G.S., LIANG, P., SCHONFELD, P. and LARSON, R.; 1995. *Adaptive Control of Transit Operations*. Report No. MD-26-7002, U.S, Department of Transportation, Federal Transit Administration.

LIN, W-H.; 2007. The Effect of Queuing Representations on Modeling Transit Signal Priority Systems in Mixed Mode Operation. *International Transactions in Operational Research*, Vol. 14, p. 3-14.

LIU, H., SKABARDONIS, A. and ZHANG, W.; 2003. A Dynamic Model for Adaptive Bus Signal Priority. *Transportation Research Board, 82nd Annual Meeting*, Washington, D.C.

MILLER, M., YIN, Y., BALVANYOS, T., and CEDER, A.; 2004. *Framework for Bus Rapid Transit Development and Deployment Planning*. Research report, California PATH.

MIRABDAL, J. and THESEN, B.; 2002. Using Video Detection for Transit Priority. *ITE*

Conference.

MIRCHANDANI, P., HEAD, L., KNYAZYAN, A. and WU, W.; 2001. An Approach Towards the Integration of Bus Priority and Traffic Adaptive Signal Control. *In Proceedings of the 80th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, DC, USA.

NASH, A and SYLVIA, R.; 2001. *Implementation of Zürich's Transit Priority Program*. Mineta Transportation Institute, College of Business, San José State University, San Jose, CA.

NIA 2002; 2002. *National ITS Architecture*. Inc. Iteris. Federal Highway Administration.

O' DELL, S.W. and WILSON, N.H.M.; 1999. Optimal Real-Time Control Strategies for Rail Transit Operations During Disruptions. Wilson, N.H.M. (Ed.), *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems: Computer-Aided Transit Scheduling*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Vol. 471, p. 299-323.

PUONG, A. and WILSON, N.H.M.; 2004. A Train Holding Model for Urban Rail Transit Systems. *In Proceedings of Conference on Computer Aided Scheduling on Public Transport*.

SHALABY, A. and LEE, J.; 2006. Development, Evaluation, and Selection of Advanced Transit Signal Priority Concept Directions. *Journal of Public Transportation*, Vol. 9, No. 5.

SHOUP, G.E. and BULLOCK, D.; 1999. A Dynamic Offset Tuning Procedure Using Travel Time Data. *Transportation Research Record*, #1683, TRB, National Research Council, Washington, DC, p. 84-94.

SKABARDONIS, A.; 1998a. *Control Strategies for Transit Priority*. California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH), Research Reports: Paper UCB-ITS-PRR-98-2.

SKABARDONIS, A., BERTINI, R.L. and GALLAGHER, B.R.; 1998b. Development and Application of Control Strategies for Signalized Intersections in Coordinated Systems. *Transportation Research Record*, PAPER No. 981271, p. 1-26.

STRATHMAN, J.G.; KIMPEL, T.J., DUERKER, K.J., GERHART, R.L., TURNER, K., and GRIFFIN, D.; 2001. Bus Transit Operation Control: Review and an Experiment Involving TriMet's Automated Bus Dispatching System. *Journal of Public Transportation*, Vol. 4, No. 1, p. 1-26.

SUN, A. and HICKMAN, M.; 2001. An Analytic Stochastic Model for the Transit Vehicle Holding Problem. *Transportation Science*; Vol. 35, No. 3, p. 215-237.

SUN, A. and HICKMAN, M.; 2004. The Holding Problem at Multiple Holding Stations. *In Proceedings of the 9th International Conference on Computer-Aided Scheduling of Public Transport*, San Diego, California, USA.

SUNKARI, S.R., Beasley, P.S., Urbanik, T., FAMBRO, D.B.; 1995. Model to Evaluate the Impacts of Bus Priority on Signalized Intersections. *Transportation Research Record*, No. 1494, p. 117-123.

TODD, M., BARTH, M., EICHLER, M., DAGANZO, C., and SHAHEEN, S.A.; 2006. *Enhanced Transit Strategies: Bus Lanes with Intermittent Priority and ITS Technology Architectures for TOD Enhancement*. California PATH Research Report number UCB-ITS-PRR-2006-02.

TRB 2000 - Transportation Research Board; 2000. *Highway Capacity Manual* (NRC).

TURNQUIST, M.A. and BLUME, S.W.; 1980. Evaluating Potential Effectiveness of Headway Control Strategies for Transit Systems. *Transportation Research Record*, No. 746, p. 25-29.

VIEGAS, J. and LU, B.; 2001. Widening the Scope for Bus Priority with Intermittent Bus Lanes. *Transportation Planning and Technology*, Vol. 24, No. 2, p. 87-110.

WEBSTER, F.V.; (1958). Traffic signal settings. *Road research technical paper*, No. 39, HMSO, London.

WILSON, N. H. M. and LIN, T.; 1992. Dwell Time Relationships for Light Rail Systems. *Transportation Research Record*, No. 1361, p. 287–295.

YAGAR, S.; 1993. Efficient Transit Priority at Intersections. *Transportation Research Record*, No. 1390, p. 10-15.

ZHAO, J., DESSOUKY, M. and BUKKAPATNAM, S.; 2001. Distributed Holding Control of Bus Transit Operations. *In Proceedings of the IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings – Oakland (CA) USA*, August 25-29, 2001.

ZIGBEE Standards Organization; 2007. *ZigBee Specification*. ZigBee Alliance. Retrieved from <http://www.zigbee.org/en/> in November 2008.

ZOLFAGHARI, S., AZIZI, N. and JABER, M.Y.; 2004. A Model for Holding Strategy in Public Transit Systems with Real-Time Information. *International Journal of Transport Management* Vol. 2, p. 99-110.